

Державний університет інфраструктури та технологій  
Київський інститут водного транспорту ім. гетьмана Конашевича-Сагайдачного

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КАЛІНІЧЕНКО ТЕТЯНА ВАЛЕНТИНІВНА**

УДК 656.061.052

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ  
ПОВЕРНЕННЯ НА ПРОГРАМНІ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ**

Спеціальність: 271 – морський та внутрішній водний транспорт

Галузь знань: 27 - Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

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

Т. В. Калініченко

Науковий керівник: Тимощук Олена Миколаївна  
доктор технічних наук, професор

**Київ – 2025**

## АНОТАЦІЯ

**Калініченко Т.В. Розробка методу розходження суден з урахуванням повернення на програмні траєкторії руху. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 271 – морський та внутрішній водний транспорт. – Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2025.

У дисертаційній роботі вирішене актуальне наукове завдання з розробки методу розходження суден з урахуванням повернення на програмні траєкторії руху.

Однією з найактуальніших у судноводінні є проблема забезпечення безаварійного розходження суден у стиснених водах, якій присвячені роботи вчених різних країн світу. Численні дослідження, присвячені проблемі вибору безпечного маневру розходження суден, що небезпечно зближуються, в переважній більшості під маневром розходження мають на увазі тільки ухилення судна з програмної траєкторії руху, що забезпечує максимально безпечну дистанцію найкоротшого зближення. Подальше керування судном після завершення моменту найкоротшого зближення у таких роботах не обговорюється, вважаючи, що питання вибору подальшої траєкторії руху судна є тривіальним. У найпростішому випадку, коли ситуація небезпечного зближення виникає у відкритому морі за відсутності інших суден у районі можливого зіткнення, в разі вибору лише безпечного ухилення, а не оптимального маневру розходження, а також у випадку зближення суден на зустрічних курсах, можна вважати, що небезпека зіткнення існує лише на ділянці ухилення.

У загальному випадку загроза зіткнення найімовірніша під час плавання у стиснених водах, що характеризуються високою щільністю інтенсивності руху суден та наявністю численних навігаційних небезпек. У таких умовах плавання вихід на програмну траєкторію є частиною стратегії безпечного розходження

суден. Більше того, навіть на вільній від заважаючих суден і навігаційних небезпек акваторії в разі небезпечного зближення суден на курсах, що перетинаються, і обгоні зіткнення можливі, як на ділянці ухилення, так і на ділянці повернення на програмну траєкторію руху.

У стратегію розходження крім ділянки ухилення судна із заданою траєкторією також включено ділянку повернення на неї, а розрахунок параметрів стратегії проводився з урахуванням обмежень на безпечне розходження для обох ділянок.

Отже, проблема забезпечення безпеки судноводіння у стиснених водах потребує подальшого вирішення, причому необхідна розробка методу вибору безпечного маневру повернення на програмну траєкторію руху, чим обумовлений вибір тематики дисертаційного дослідження. Тому *наукове завдання* з розроблення методу розходження суден з урахуванням повернення на програмні траєкторії руху є *актуальним* і дозволить вирішити виниклу проблемну ситуацію.

Вказана постановка завдання є важливим питанням при плаванні морських суден у стиснених умовах через інтенсивне судноплавство та навігаційні небезпеки, що підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій. У стиснених умовах виникає небезпека зіткнення суден після безпечного ухилення на етапі повернення на програмні траєкторії руху. Проте, питання маневрування суден під час повернення на програмні траєкторії досліджено недостатньо, що й обумовлює *актуальність дисертаційного дослідження*, оскільки в ситуації небезпечного зближення судна з ціллю сприяє прийняттю судноводієм коректних рішень.

*Метою дослідження* є розробка методу розходження суден у стиснених водах на невеликих відстанях з урахуванням їх повернення на програмні траєкторії руху.

Поставлена мета досягається вирішенням таких часткових завдань:

1. Розробка аналітичної процедури визначення моменту часу етапу завершення ухилення та початку повернення на програмну траєкторію з урахуванням навігаційних перешкод та заважаючих суден.

2. Спосіб вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію за наявності та відсутності координації їхньої взаємодії.

3. Формування методу оперативного керування судном при виході на програмну траєкторію за станом поточної ситуації.

*За об'єкт дослідження розглядається процес запобігання зіткнень суден.*

*Предметом дослідження є маневр повернення суден на програмну траєкторію руху.*

Поставлені у дисертаційній роботі завдання вирішені із використанням таких методів дослідження:

– дослідження операцій для поділу головного завдання дисертації на три складові;

– теорії ієрархічних багаторівневих систем та теорії координації для розробки математичної моделі вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію руху за наявності та відсутності координації їхньої взаємодії;

– теорії керування під час дослідження впливу спільних маневрів повернення суден на програмні траєкторії руху та вибору безпечного маневру;

– теорії математичного програмування для вибору оптимального оперативного керування виходом судна на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації;

– синтезу моделей під час розробки імітаційної моделі дисертаційного дослідження.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у розробці нового методу розходження суден з урахуванням їх повернення на програмні траєкторії руху. При цьому можна виділити такі основні нові наукові результати:

1. *Вперше отримано спосіб вибору безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію руху одним із трьох типів траєкторії з урахуванням початкової ситуації та поводження цілі.*

2. *Вперше запропоновано спосіб вибору спільного безпечного маневру*

повернення судна та цілі на програмні траєкторії руху з урахуванням координації їхньої взаємодії.

3. *Вперше сформовано* метод оперативного керування судном під час виходу на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації.

4. *Удосконалено* математичну модель процесу розходження суден шляхом врахування динамічних характеристик судна при виконанні маневру повернення на програмну траєкторію руху.

5. *Отримав подальший розвиток* метод формування областей небезпечних значень параметрів руху суден за рахунок врахування особливостей маневру повернення на програмну траєкторію.

*Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій* підтверджується коректністю постановки завдання дослідження та правильним використанням методів дослідження операцій, теорії ієрархічних багаторівневих систем та теорії координації, теорії керування та теорії математичного програмування. Основні теоретичні положення дисертаційної роботи базуються на початкових посилках і допущеннях, які виходять із існуючого стану робіт у даній області та не суперечать відомим положенням і результатам досліджень, приведеним у літературі.

*Наукове значення роботи* полягає в розробленні способу розходження суден з урахуванням повернення їх на програмні траєкторії руху, який відрізняється тим, що використовується оперативне керування виходом судна на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації з урахуванням координації маневрування суден і без неї.

*Практичне значення отриманих результатів* полягає в тому, що отриманий у дисертації спосіб вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію може бути використаний не тільки для розходження суден, а й для керування іншими рухомими об'єктами в районах підвищеної інтенсивності руху.

Результати дисертаційної роботи мають значну практичну цінність, яка визначається тим, що алгоритми, програми та імітаційна модель можуть бути

впроваджені на судах для вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію у стиснених умовах плавання, під час проектування ЗАРП з функціями вибору оптимального маневру розходження та розробці систем розходження суден, під час навчання та підвищення кваліфікації судноводіїв.

Результати дослідження використані:

- метод оперативного управління судном та метод розходження судна з урахуванням повернення на програмні траєкторії (акт впровадження у компанії «ITM UKRAINE LTD» від 30.09.2024 р № 621-30/09);

- метод оперативного управління судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації – при викладанні освітніх компонентів «Суднові технічні засоби навігації та зв'язку» (для здобувачів наукового ступеню магістр) та «Навігаційні інформаційні системи» (для здобувачів наукового ступеню бакалавр) (акт впровадження у навчальний процес Херсонської державної морської академії від 26.09.2024 р);

- використання стенду імітаційного моделювання на базі навігаційного тренажера Navi Trainer 5000 для розробки і відпрацювання комп'ютерного моделювання безпечного повернення суден на програмні траєкторії руху – при викладанні освітнього компоненту «Навігаційні інформаційні системи» (для здобувачів наукового ступеню бакалавр) для моніторингу якості виконання лабораторних робіт здобувачами освіти (акт впровадження у навчальний процес Херсонської державної морської академії від 26.09.2024 р);

- метод оперативного управління судном та метод розходження суден з урахуванням повернення на програмні траєкторії руху використовуються у навчальному процесі факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Управління судном» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти та «Управління морехідними якостями судна» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт

впровадження у навчальний процес Державного університету інфраструктури та технологій № 06/01-11 від 07.01.2025 р);

– метод оперативного управління судном та метод розходження суден з урахуванням на програмні траєкторії руху, впроваджені і успішно використовуються у процес перепідготовки офіцерів-судноводіїв, працюючих на суднах ДП «Глобал Марін Сервіс» Компанії «GMS Marine Services LTD» (акт впровадження у компанії «GMS Marine Services LTD» від 30.09.2024 р № 279-30/09).

В роботі показаний зв'язок роботи з науковими програмами, темами, обґрунтована наукова новизна отриманих результатів, відмічений вклад дисертанта в наукові роботи, які написані у співавторстві.

**Ключові слова:** сучасні навігаційні технології, радіолокаційні системи, суднові системи, морський транспорт, водний транспорт, безпека судноплавства, судноплавство в замкнутих водах, врахування навігаційних небезпек, запобігання зіткненню суден у морі, безпечний маневр ухилення, обхід суден ухиленням, маневр повернення судна на програмну траєкторію, методи прогнозування, пошук, супроводження, морські динамічні об'єкти, безпека судноводіння, попередження зіткнення суден, комп'ютерне моделювання, маневр розходження, програмна траєкторія руху, урахування судна, що заважає, навігація, маневрування суден, оперативне управління судном, траєкторія руху, відносний курс, кутова швидкість.

## ABSTRACT

**Kalinichenko T.V. Development of the method of vessels' passing taking into account the return to the program trajectories of movement. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.**

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 271 – Maritime and Inland Water Transport. – State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, 2025.

The dissertation solves the current scientific problem of developing a method for vessels' passing taking into account the return to the program trajectories of movement.

One of the most relevant in navigation is the problem of ensuring the safe passage of vessels in congested waters, to which the studies of scientists from different countries of the world are devoted. Numerous studies devoted to the problem of choosing a safe maneuver for passing vessels that are dangerously approaching, in the vast majority of cases, by the maneuver of passage, they mean only the deviation of the vessel from the program trajectory of movement, which provides the safest possible distance of the closest approach. Further control of the vessel after the end of the closest approach is not discussed in such works, considering that the issue of choosing the further trajectory of the vessel is trivial. In the simplest case, when a situation of dangerous approach occurs in the open sea in the absence of other vessels in the area of a possible collision, in the case of choosing only safe evasion, and not the optimal passing maneuver, as well as in the case of vessels approaching on opposite courses, it can be assumed that the danger of collision exists only in the evasion section. In the general case, the threat of collision is most likely when sailing in confined waters, characterized by a high density of vessel traffic and the presence of numerous navigational hazards. In such sailing conditions, return to the program trajectory is part of the strategy of safe passage of vessels. Moreover, even in a water area free from interfering vessels and navigational

hazards, in the event of a dangerous approach of vessels on intersecting courses, overtaking and collisions are possible, both in the evasion section and in the section of returning to the program trajectory.

In addition to the section of evasion of a vessel with a given trajectory, the passing strategy also includes a section of returning to it, and the calculation of the strategy parameters was carried out taking into account the restrictions on safe passage for both sections.

Thus, the problem of ensuring the safety of navigation in congested waters requires further resolution, and it is necessary to develop a method for choosing a safe maneuver for returning to the program trajectory, which is why the choice of the topic of the dissertation research is necessary. Therefore, the scientific task of developing a method for passage of vessels taking into account the return to the program trajectories is relevant and will allow solving the problem situation that has arisen.

The stated problem statement is an important issue when sailing seagoing vessels in confined conditions due to intensive shipping and navigational hazards, which increases the risk of emergency situations. In confined conditions, there is a danger of collision of vessels after safe evasion at the stage of returning to the program trajectories of movement. However, the issue of maneuvering vessels during the return to the program trajectories has not been studied sufficiently, which determines the relevance of the dissertation research, since in a situation of dangerous approach of the vessel with the target it contributes to the adoption of correct decisions by the navigator.

*The purpose of the research* is to develop a method for the passage of vessels in confined waters at short distances, taking into account their return to the program trajectories of movement.

The set goal is achieved by solving the following partial tasks:

1. Development of an analytical procedure for determining the moment of time of the stage of completion of evasion and the beginning of the return to the program trajectory, taking into account navigational obstacles and interfering vessels.

2. The method of choosing a safe maneuver for returning vessels to the program trajectory in the presence and absence of coordination of their interaction.

3. Formation of a method for operational control of a vessel when entering the program trajectory based on the current situation.

*The object of the study* is the process of prevention of vessel collisions.

*The subject of the study* is the maneuver for returning vessels to the program trajectory of movement.

The tasks set in the dissertation work were solved using the following research methods:

- operations research to divide the main task of the dissertation into three components;
- theories of hierarchical multi-level systems and coordination theory to develop a mathematical model for choosing a safe maneuver for returning vessels to the program trajectory of movement in the presence and absence of coordination of their interaction;
- control theories when studying the impact of joint maneuvers for returning vessels to the program trajectories of movement and choosing a safe maneuver;
- mathematical programming theory for selecting the optimal operational control of the vessel's exit to the program trajectory of movement based on the current situation;
- model synthesis during the development of the simulation model of the dissertation research.

**The scientific novelty of the obtained results** lies in the development of a new method of vessels' passage taking into account their return to the program trajectory of movement. At the same time, the following main new scientific results can be distinguished:

1. *For the first time, a method was obtained* for selecting a safe maneuver for the vessel's return to the program trajectory of movement using one of three types of trajectory, taking into account the initial situation and the behavior of the target.

2. *For the first time, a method was proposed* for selecting a joint safe maneuver

for the vessel and the target to return to the program trajectory of movement, taking into account the coordination of their interaction.

3. *For the first time, a method for operational control of the vessel during entry to the program trajectory of movement based on the current situation was formed.*

4. The mathematical model of the process of vessel passage *was improved* by taking into account the dynamic characteristics of the vessel when performing the maneuver of returning to the program trajectory of movement.

5. The method of forming areas of dangerous values of vessel motion parameters by taking into account the features of the maneuver of returning to the program trajectory *has been further developed.*

*The validity and reliability of scientific provisions, conclusions and recommendations* is confirmed by the correctness of the formulation of the research task and the correct use of methods of operations research, the theory of hierarchical multi-level systems and the theory of coordination, control theory and the theory of mathematical programming. The main theoretical provisions of the dissertation are based on the initial premises and assumptions that proceed from the existing state of work in this area and do not contradict the known provisions and research results given in the literature.

*The scientific significance of the work* lies in the development of a method for the passage of vessels taking into account their return to the program trajectories of movement, which is distinguished by the fact that operational control of the vessel's return to the program trajectory of movement is used according to the current situation, taking into account the coordination of vessel maneuvering and without it.

*The practical significance of the results obtained* is that the method of selecting a safe maneuver for returning vessels to the program trajectory obtained in the dissertation can be used not only for vessel passage, but also for controlling other moving objects in areas of increased traffic intensity.

The results of the dissertation have significant practical value, which is determined by the fact that algorithms, programs and a simulation model can be implemented on vessels to select a safe maneuver for returning vessels to the program

trajectory in confined navigation conditions, during the design of ARPA with the functions of selecting the optimal passing maneuver and the development of vessel passage systems, during the training and advanced training of navigators.

The results of the study were used:

- the method of operational vessel control and the method of vessel passage taking into account the return to the program trajectories (the act of implementation in the company «ITM UKRAINE LTD» dated 30.09.2024 No. 621-30/09);
- method of operational control of the vessel during entry into the program trajectory according to the current situation – when teaching the educational components «Ship technical means of navigation and communication» (for applicants for a master's degree) and «Navigation information systems» (for applicants for a bachelor's degree) (act of introduction into the educational process of the Kherson State Maritime Academy dated 09/26/2024);
- use of a simulation stand based on the Navi Trainer 5000 navigation simulator for the development and testing of computer modeling of the safe return of vessels to the program trajectories of movement – when teaching the educational component «Navigation information systems» (for applicants for a bachelor's degree) for monitoring the quality of laboratory work by applicants for education (act of introduction into the educational process of the Kherson State Maritime Academy dated 09/26/2024);
- the method of operational vessel control and the method of vessel divergence taking into account the return to the program trajectories of movement are used in the educational process of the Faculty of Navigation at the Department of Navigation and Ship Handling when teaching the disciplines "Ship Handling" for applicants of the first (bachelor's) level of higher education and "Management of Seaworthiness of Vessels" for applicants of the second (master's) level of higher education in the specialty 271 Maritime and Inland Water Transport (act of introduction into the educational process of the State University of Infrastructure and Technologies No. 06/01-11 dated 07.01.2025);
- the method of operational vessel control and the method for the passage of

vessel taking into account the program trajectories of movement, implemented and successfully used in the process of retraining officers-navigators working on vessels of the DI “Global Marine Service” of the Company “GMS Marine Services LTD” (act of implementation in the company “GMS Marine Services LTD” dated 09/30/2024 № 279-30/09).

The paper shows the connection of the work with scientific programs, topics, substantiates the scientific novelty of the results obtained, notes the contribution of the dissertation candidate to the scientific works written in co-authorship.

**Keywords:** modern navigation technologies, radar systems, ship systems, maritime transport, water transport, shipping safety, shipping in closed waters, taking into account navigation hazards, preventing ship collisions at sea, safe evasive maneuver, bypassing ships by evasiveness, maneuver of returning the ship to the programmed trajectory, forecasting methods, search, escort, marine dynamic objects, navigation safety, preventing ship collisions, computer modeling, passing maneuver, program trajectory of movement, taking into account the interfering ship, navigation, ship maneuvering, operational control of the ship, trajectory of movement, relative course, angular velocity.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:*

1. Kalinichenko T., Tymoshchuk O., Tomchakovsky G. Maneuver of returning the vessel to the set track after passing the target. *Науково-технічний збірник «Судноводіння / Shipping & Navigation»*. –2022. – Вип. 34. – С. 59-65. doi: 10.31653/2306-5761.34.2023.59-65 [https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023\\_T.-Kalinichenko-O.-Tymoshchuk-G.-Tomchakovsky-Maneuver-of-returning-the-vessel-to-the-set-track-after-passing-the-target.pdf](https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023_T.-Kalinichenko-O.-Tymoshchuk-G.-Tomchakovsky-Maneuver-of-returning-the-vessel-to-the-set-track-after-passing-the-target.pdf).
2. Ганношина І.М., Калініченко Т.В., Нікітін П.В. Дослідження методів прогнозування руху, пошуку та супроводження морських об'єктів. *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – № 2(36). – 2022. – С. 135-149. doi: doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.11 <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/237>
3. Калініченко Т.В. Комп'ютерне моделювання безпечного повернення суден на програмні траєкторії руху. *Наука і техніка сьогодні*. – №11 (25). – 2023. С. 670-677 [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-11\(25\)-670-677](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-11(25)-670-677) <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/6605>
4. Калініченко Т.В. Вибір маневра повернення судна на програмну траєкторію руху без координації з ціллю. *Вісник Одеського національного морського університету*. – Вип. 70. – 2023. – С. 47-57. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-47-57> <http://visnyk.onmu.org.ua/index.php/1/article/view/164>.
5. Калініченко Т.В. Урахування судна, що заважає, під час розходження судна з судном-ціллю на малих відстанях. *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – № 1(37). – 2023. – С. 79-85. doi: doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.08 <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/255>

6. Калініченко Т.В. Розробка методу оперативного управління судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації. *Вісник Одеського національного морського університету*. – Вип. 73. – 2024. – С. 155-169. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2024-2-155-169>

<http://visnyk.onmu.org.ua/index.php/1/article/view/216>.

7. Калініченко Т.В. Основні напрямки підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнення суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. – Вип. 48. – 2024. – С. 178-183. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310709>

[https://journals.uran.ua/vestnikpgtu\\_tech/article/view/310709](https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/310709)

*Публікація в виданнях, що входять до провідних міжнародних наукометричних баз*

8. Kalinichenko T. Characteristics of the divergence of vessels at small initial distances. *European Science, Scientific research in modern conditions of instability*. –1(sge24-01). – 2023. – С. 92–135. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-24-01-015> <https://desymp.promonograph.org/index.php/sge/article/view/sge24-01-015> (*IndexCopernicus*).

9. Kalinichenko T., Kalinichenko Y., Tymoshchuk O. Account of navigational hazards when the ship and the target are avoiding collision at small distances. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*. – 2022. – С. 35-37. <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2022.002665> <https://journal.eu-jr.eu/ttfpits/article/view/2665> (*IndexCopernicus*).

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

10. Тимошук О.М., Калініченко Т.В., Вінідчук С.О. Формалізація процесу побудови моделі розподіленого об'єкта управління. *Дніпровські читання-2022: матеріали III Міжнародної наук.-практ. конф. 8 грудня 2022 р. м. Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій, 2022. 276 с.*

11. Калініченко Т.В. Розходження суден на незначних дистанціях за наявності точкової навігаційної небезпеки. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)*: Збірка матеріалів XV Міжнародної наук.-практ. конф. 24-25 травня 2023 р.. м. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2023. 344 с.

12. Тимощук О.М., Калініченко Т.В. Вибір маневра повернення судна на програмну траєкторію руху без координації з ціллю. *Дніпровські читання-2023*: матеріали IV Міжнародної наук.-практ. конф. 7 грудня 2023 р. м. Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій, 2023. 322 с.

13. Калініченко Т.В. Вибір маневра повернення судна на програмну траєкторію руху без координації з ціллю. *Наукові підсумки 2023 року*: збірка XII наук. конф. 20 грудня 2023 р. м Харків: вид-во Технологічний центр, 2023. 98 С.

14. Тимощук О.М., Калініченко Т.В. Аналіз потенціалу підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнення суден. *Навігація та керування судном: нові підходи, навчання та моделювання*: матеріали I Міжнародної наук.-практ. конф. 23-24 вересня 2024 р. м. Одеса: ОНМУ, 2024. 109 с.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ ШЛЯХОМ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН.....	25
1.1 Аналіз літературних джерел за проблемою забезпечення безаварійного плавання суден оптимізацією процесу їх розходження.....	25
1.2 Вибір основних напрямів наукового дослідження та обґрунтування вибору теми дисертаційного дослідження .....	56
1.3 Технологічна карта та структура вирішення завдань дисертаційного дослідження.....	60
1.4 Методика проведення дисертаційного дослідження .....	64
Висновки з першого розділу дисертації .....	65
РОЗДІЛ 2 ОСОБЛИВОСТІ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН НА МАЛИХ ПОЧАТКОВИХ ДИСТАНЦІЯХ.....	68
2.1. Застосування методів теорії динамічних $n$ -керованих систем для формалізації процесу розходження суден.....	68
2.2. Врахування навігаційних небезпек і суден, що заважають, на етапі ухилення під час розходження судна і цілі на малих відстанях .....	84
2.3. Розрахунок параметрів маневру повернення судна на задану траєкторію руху після розходження з ціллю .....	92
Висновки з другого розділу дисертації .....	101
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИБОРУ МАНЕВРА ПОВЕРНЕННЯ СУДЕН НА ПРОГРАМНІ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ЗА МАЛИХ ПОЧАТКОВИХ ДИСТАНЦІЙ .....	103
3.1. Вибір маневру повернення судна на програмну траєкторію руху без координат з ціллю .....	103
3.2. Координація суден під час їхнього повернення на програмні траєкторії руху.....	129
3.3. Розробка методу оперативного управління судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації.....	138

Висновки з третього розділу дисертації .....	145
РОЗДІЛ 4 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	148
4.1. Алгоритм вибору маневру повернення судна на програмну траєкторію руху.....	148
4.2. Опис програми імітаційного моделювання вибору безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію.....	155
Висновки із четвертого розділу дисертації .....	168
ВИСНОВКИ.....	170
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173
ДОДАТОК А.....	190
ДОДАТОК Б.....	216
ДОДАТОК В.....	219

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Під час плавання морських суден у стиснених умовах через інтенсивне судноплавство та навігаційні небезпеки підвищується ризик виникнення аварійних ситуацій. Зростання інтенсивності судноплавства, збільшення розмірів та швидкостей суден при одночасному підвищенні вимог до безпеки мореплавання обумовлюють необхідність розробки нових методів забезпечення безаварійного плавання.

Особливо гостро проблема безпечного розходження суден постає в районах інтенсивного судноплавства та стиснених водах, де існують додаткові навігаційні обмеження. У таких умовах виникає небезпека зіткнення суден не тільки під час їх безпосереднього зближення, але й після безпечного ухилення на етапі повернення на програмні траєкторії руху. Ця обставина суттєво ускладнює процес вибору безпечного маневру розходження.

Аналіз сучасного стану проблеми показує, що існуючі методи розходження суден орієнтовані переважно на етап ухилення та не враховують у повній мірі особливості маневру повернення на програмну траєкторію руху. При цьому відсутні чіткі рекомендації щодо вибору параметрів цього маневру з урахуванням взаємного впливу суден, що розходяться.

Сучасні системи підтримки прийняття рішень з управління рухом суден недостатньо ефективно вирішують задачу вибору безпечного маневру повернення на програмну траєкторію після розходження. Це пов'язано з відсутністю відповідних методів, які б враховували динамічні характеристики суден та забезпечували координацію їх взаємодії на цьому етапі маневрування.

Питання маневрування суден під час повернення на програмні траєкторії досліджено недостатньо, тому дана тематика досліджень є актуальною та перспективною, оскільки в ситуації небезпечного зближення судна з ціллю сприяє прийняттю судноводієм коректних рішень. Розробка методу розходження суден з урахуванням їх повернення на програмні траєкторії руху дозволить підвищити безпеку судноводіння та ефективність процесу

розходження суден.

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

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

Дисертаційна робота виконана відповідно до Тематичного плану наукових досліджень та розробок Державного університету інфраструктури та технологій, з виконанням науково-дослідної роботи (НДР) «Розробка методів запобігання зіткнення суден для підвищення безпеки судноплавства на основі формалізації навігаційних ситуацій» № ДР 0119U103754.

**Мета і завдання дослідження.** *Метою* дисертаційної роботи стала розробка методу розходження суден у стиснених водах на невеликих відстанях з урахуванням їх повернення на програмні траєкторії руху.

Головне завдання дослідження полягає у формуванні алгоритму вибору маневру повернення суден на програмні траєкторії руху після безпечного ухилення.

Головне завдання дослідження в дисертації представлено трьома складовими приватними завданнями, вирішення яких дозволяють знайти потрібне рішення:

1. Розробка аналітичної процедури визначення моменту часу етапу завершення ухилення та початку повернення на програмну траєкторію з урахуванням навігаційних перешкод та заважаючих суден.

2. Спосіб вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію за наявності та відсутності координати їхньої взаємодії.

3. Формування методу оперативного керування судном при виході на програмну траєкторію за станом поточної ситуації.

*Об'єктом дослідження* є запобігання зіткнень суден.

*Предметом дослідження є маневр повернення суден на програмну траєкторію руху.*

*Для вирішення поставлених у дисертації завдань застосовувалися такі методи дослідження:*

- дослідження операцій для поділу головного завдання дисертації на три складові;
- теорії ієрархічних багаторівневих систем та теорії координації для розробки математичної моделі вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію руху за наявності та відсутності координації їхньої взаємодії;
- теорії керування під час дослідження впливу спільних маневрів повернення суден на програмні траєкторії руху та вибору безпечного маневру;
- теорії математичного програмування для вибору оптимального оперативного керування виходом судна на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації;
- синтезу моделей під час розробки імітаційної моделі дисертаційного дослідження.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розробці нового методу розходження суден з урахуванням їх повернення на програмні траєкторії руху, який відрізняється тим, що використовується оперативне керування виходом судна на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації з урахуванням координації маневрування суден і без неї.

Наступні результати містять наукову новизну:

1. *Вперше розроблено* спосіб вибору безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію руху одним із трьох типів траєкторії з урахуванням початкової ситуації та поведінки цілі. На відміну від існуючих підходів, враховується можливість реалізації трьох типів траєкторій повернення та обирається оптимальний варіант за критерієм мінімуму часу маневру при забезпеченні безпечної дистанції розходження.

2. *Вперше запропоновано* спосіб вибору спільного безпечного маневру повернення судна та цілі на програмні траєкторії руху з урахуванням

координації їхньої взаємодії. Новизна полягає у врахуванні взаємного впливу маневрів обох суден та їх узгодженні для забезпечення безпечного розходження.

3. *Вперше сформовано* метод оперативного керування судном під час виходу на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації, що дозволяє в режимі реального часу корегувати параметри маневру з урахуванням зміни навігаційної обстановки.

4. *Удосконалено* математичну модель процесу розходження суден шляхом врахування динамічних характеристик судна при виконанні маневру повернення на програмну траєкторію руху.

5. *Отримав подальший розвиток* метод формування областей небезпечних значень параметрів руху суден за рахунок врахування особливостей маневру повернення на програмну траєкторію.

**Наукове значення роботи** полягає в розробленні способу розходження суден з урахуванням повернення їх на програмні траєкторії руху, який відрізняється тим, що використовується оперативне керування виходом судна на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації з урахуванням координації маневрування суден і без неї.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що отриманий у дисертації спосіб вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію може бути використаний не тільки для розходження суден, а й для керування іншими рухомими об'єктами в районах підвищеної інтенсивності руху. Результати дисертаційної роботи мають значну практичну цінність, яка визначається тим, що алгоритми, програми та імітаційна модель можуть бути впроваджені на суднах для вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію у стиснених умовах плавання, під час проектування ЗАРП з функціями вибору оптимального маневру розходження та розробці систем розходження суден, під час навчання та підвищення кваліфікації судноводіїв.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено:

- в компанії «ITM UKRAINE LTD» при перепідготовці офіцерів-

судноводіїв для вивчення методу оперативного управління судном та методу розходження судна з урахуванням повернення на програмні траєкторії (акт впровадження 621-30/09 від 30.09.2024 р.);

- метод оперативного управління судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації – при викладанні освітніх компонентів «Суднові технічні засоби навігації та зв'язку» (для здобувачів наукового ступеню магістр) та «Навігаційні інформаційні системи» (для здобувачів наукового ступеню бакалавр) (акт впровадження у навчальний процес Херсонської державної морської академії від 26.09.2024 р);

– використання стенду імітаційного моделювання на базі навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000 для розробки і відпрацювання комп'ютерного моделювання безпечного повернення суден на програмні траєкторії руху – при викладанні освітнього компоненту «Навігаційні інформаційні системи» (для здобувачів наукового ступеню бакалавр) для моніторингу якості виконання лабораторних робіт здобувачами освіти (акт впровадження у навчальний процес Херсонської державної морської академії від 26.09.2024 р);

– метод оперативного управління судном та метод розходження суден з урахуванням повернення на програмні траєкторії руху використовуються у навчальному процесі факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Управління судном» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти та «Управління морехідними якостями судна» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт (акт впровадження у навчальний процес Державного університету інфраструктури та технологій № 06/01-11 від 07.01.2025 р);

– метод оперативного управління судном та метод розходження суден з урахуванням на програмні траєкторії руху, впроваджені і успішно використовуються у процес перепідготовки офіцерів-судноводіїв, працюючих на суднах ДП «Глобал Марін Сервіс» Компанії «GMS Marine Services LTD»

(акт впровадження у компанії «GMS Marine Services LTD» від 30.09.2024 р № 279-30/09).

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати, що становлять основний зміст дисертаційної роботи, опубліковані у роботах [127, 134-141], одержані автором самостійно або за його безпосередньої участі..

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на:

III Міжнародній науково-практичній конференції 8 грудня 2022 р. «Дніпровські читання-2022»: м. Київ.

На XV Міжнародній науково-практичній конференції 24-25 травня 2023 р. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)»: м. Херсон.

На IV Міжнародній науково-практичній конференції 7 грудня 2023 р. «Дніпровські читання-2023»: м. Київ.

На XII Науковій конференції 20 грудня 2023 р. «Наукові підсумки 2023 року»: м Харків.

На I Міжнародній науково-практичній конференції 23-24 вересня 2024 р. «Навігація та керування судном: нові підходи, навчання та моделювання»: м. Одеса

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 7 наукових статей в українських виданнях, які входять до затвердженого МОН України переліку наукових фахових видань, 2 наукові статті, які мають індексацію у наукометричній базі Index Copernicus та 5 публікації матеріалів доповідей, які додатково відображають результати роботи.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації містить 222 сторінки друкованого комп'ютерного тексту. Основний зміст дисертаційної роботи викладено на 172 сторінках. Робота містить 4 таблиці, 35 рисунків, список використаних джерел із 141 найменувань, що розміщено на 173-188 сторінках, 3 додатки на 33 сторінка.

## РОЗДІЛ 1

### ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ ШЛЯХОМ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН

#### 1.1 Аналіз літературних джерел за проблемою забезпечення безаварійного плавання суден оптимізацією процесу їх розходження

Одною з найбільш важливих проблем забезпечення безаварійного судноводіння є попередження зіткнень суден в стиснених водах із інтенсивним судноплавством.

Розходженню судна з поодинокую ціллю в разі відсутності навігаційних перешкод присвячені роботи [1–3], в яких одержано аналітичні вирази, що характеризують області безпечних курсів і швидкостей зустрічних суден, а також залежності між істинними і відносними параметрами їх руху. Для цього були застосовані методи оптимального керування.

В роботах [4–7] були опубліковані перші систематизовані результати дослідження щодо оптимізації процесу розходження суден. В роботі [4] викладено початковий етап досліджень, в якому методами теорії оптимального керування розроблено математичну модель процесу розходження судна із декількома цілями.

У роботі запропоновано логічну модель МПЗЗС-72, на вхід якої подається інформація про початкову відносну позицію судна та цілі та їх параметри руху, а на виході за допомогою розробленого алгоритму формується безпечна область курсів і швидкостей судна, що вирішує задачу розходження, з якої методами лінійного програмування вибирається оптимальний маневр розходження.

Подальший розвиток аналізованої моделі відбувався у напрямі використання методів позиційних диференціально-різницевих ігор, що показано в роботах [5–7]. Залежно від початкової позиції визначається множина стратегій відносно кожного із зустрічних суден, після чого формуються можливі стратегії

зустрічних суден, що максимально збільшують значення критерію оптимальності базового судна (відстань до порту призначення), з яких знаходиться область безпечних маневрів розходження базового судна і вибирається стратегія з мінімальним значенням критерію оптимальності. Для цього формується задача лінійного програмування, в якій лінеаризації піддаються нелінійні обмеження безпеки розходження і урахуванню навігаційних перешкод.

В монографіях [8,9] викладено метод нелінійної інтегральної інваріантності, який у роботах співробітників інституту Кібернетики ім. В.М. Глушкова АН України використаний для опису процесу розходження суден і створенню системи попередження їх зіткнень.

Спосіб формування допустимих областей маневру судна методом нелінійної інтегральної інваріантності, для яких розходження судна із декількома цілями є безпечним, запропоновано в роботах [10–14]. В роботі [15] викладено можливий варіант формалізації МПЗС-72, а у роботі [16] розглянуто ієрархію цілей ергатичної системи керування судном, що її організовано на базі методу нелінійної інтегральної інваріантності.

Групою вчених було одержано авторське свідоцтво [17] на винахід системи попередження зіткнень суден «Антикон», а в роботі [18] приведено результати математичного моделювання функціонування ергатичної системи попередження зіткнень суден.

Особливістю системи попередження зіткнень суден, як відмічається в статті [19], є властивість ергатичності, тобто ЕОМ формує область безпечних маневрів в один крок, а судноводій із області вибирає один в залежності від свого критерію оптимальності.

У роботах [20,21] обговорюється використання маневрів розходження, що складаються із двох елементів, тобто одночасної зміни курсу і швидкості або послідовною двократною зміною курсу базового судна через деякий інтервал часу.

Для рішення задачі синтезу оптимального керування судном при розходженні в роботах [22,23] запропоновано методи теорії оптимальних дискретних процесів. У задачі розглянуто три критерії оптимальності: критерій мінімального відхилення судна від заданого курсу (МВК), критерій мінімального відхилення судна від заданої траєкторії (МВТ) і критерій мінімуму перекладань керма (МПК).

Накладаються обмеження на величину кутової швидкості судна, його поточні значення курсу і координат. В якості керування судном вибрана зміна його кутової швидкості за незмінного модуля швидкості судна. Область допустимих керувань формується значеннями кутової швидкості, які задовольняють приведеним обмеженням.

Аналітичний вид критерію оптимальності й обмежень унеможливають рішення задачі в явному вигляді, через що в роботах приведено алгоритм її чисельного рішення, який використовує методи теорії оптимальних дискретних процесів. Пошук оптимального керування за кожним із критеріїв (МПК, МВТ, МВК) аналогічний і застосовується метод можливих напрямів, який реалізовано на ЕОМ. Згідно методу спочатку знаходиться довільне допустиме керування, відносно якого методом ітерацій здійснюється пошук оптимального керування без порушення прийнятих обмежень. В разі оновлення інформації задача розв'язується повторно.

Робота [24] присвячена глибокому і багатобічному дослідженню аспектів принципу незалежного керування процесом розходження суден, до яких відносяться теорія взаємодії декількох суден в умовах небезпечного зближення, теоретичний опис динамічних багато керованих систем взаємодіючих суден з позицій існування трьох системних станів, що реалізуються залежно від типу їх взаємодії, а також математична модель системи взаємодіючих суден, як ієрархічної багаторівневої системи прийняття рішень.

У роботі розроблено спосіб формування гнучких стратегій розходження, які побудовані на мінімаксоному підході й не суперечать вимогам МПЗЗС-72 в частині маневрування, також запропонований спосіб формування

координаційного і реального каркасів, що описують складну взаємодію судна з навколишніми цілями.

Для формалізації можливих типів взаємодії суден сформована процедура визначення векторного і матричного ситуативних збурень, а також запропонований спосіб екстреного розходження суден в умовах надмірного зближення.

В роботі [25] розглянуто проблему безпечного розходження суден з урахуванням особливостей їх взаємодії, що виникає за умови їх небезпечного зближення та визначає взаємні обов'язки в процесі розходження. Проведена формалізація бінарної координації для урахування взаємодії суден згідно з МПЗЗС-72. Запропоновано стратегію екстреного розходження в разі надмірного зближення суден в ситуації невизначеності їх подальшої поведінки й відсутності координації.

Дві основні концепції керування суднами в разі небезпечного зближення розглянуто в роботі [26], однією із яких є локально-незалежна – за її використання судна незалежно приймають рішення про власний маневр розходження в залежності від вимог діючої системи узгодження маневрів розходження. В теперішній час такою системою являється МПЗЗС-72 в частині маневрування суден в разі небезпечного зближення.

Іншою концепцією керування суднами в разі небезпечного зближення є повне керування зовнішнім агентом групою суден, що зближуються, який в разі небезпечного зближення визначає загальну стратегію розходження, що включає їх взаємоузгодженні маневри.

Способи вибору оптимальних безпечних стратегій розходження, що враховують навігаційні перешкоди в районі маневрування суден, і динаміку базового судна, розроблено для обох підходів керування суднами в разі небезпечного зближення. Було проведено комп'ютерне імітаційне моделювання запропонованих методів керування суднами за умови небезпечного зближення.

Зараз основним методом розходження суден в ситуації небезпечного зближення є їх локально-незалежне керування, оскільки в процесі розвитку

судноводіння він виник раніше. Тому основні дослідження щодо проблематики попередження зіткнення суден присвячені розвитку даного методу.

У монографії [27] розглянуто метод розходження суден в морі шляхом зміщення на паралельну лінію шляху, причому для розходження застосовується одна стратегія – зміщення на лінію паралельну шляху під тим або іншим кутом до лінії вихідного курсу. Підвищення ефективності попередження зіткнень суден, як зазначається в ній, може бути досягнуто створенням нових алгоритмів та інтелектуальних систем. Критерій оптимальності є комплексним, який відображає вимоги до безпеки, помітності, завчасності та економічності маневру для попередження зіткнення. За цим критерієм здійснюється вибір оптимальної стратегії розходження.

Роботи [28–30] присвячені питанням керування судна, в яких, зокрема, розглянуто задачу розходження суден на етапі класифікації початкових ситуацій залежно від їх відносної позиції і параметрів руху.

Питання вибору оптимального курсу для розходження суден в разі криволінійного руху розглянуто в публікації [31].

В роботі [32] розглядаються результати імітаційного моделювання вибору оптимальної форми безпечної області судна, виходячи з п'яти типів форми безпечної області.

Показано, що оптимальною є область, яка має форму півкола – напівеліпса і забезпечує мінімальне ухилення судна для безпечного розходження з перешкодою.

Істотні характеристики групи суден за умови зовнішнього керування процесом судноводіння представлені у статті [33], детальніше розглянута елементарна група суден першого і другого рівня. Показано, що маневр розходження судна можна вибрати за допомогою небезпечних областей курсів і небезпечних областей швидкостей, причому одержано умови визначення оптимальних маневрів зміною курсів або швидкостей елементарної групи суден.

У статті [34] запропоновано процедуру визначення курсу ухилення судна на заданий момент часу під час розходження з небезпечною ціллю, для якої задана безпечна область. Для кругової безпечної області приведено аналітичний вираз розрахунку приросту гранично допустимої відстані зближення, який враховує інерційність судна при повороті.

Механізм координації в частині визначення областей взаємних обов'язків в разі небезпечного зближення групи числом більш ніж два судна запропоновано у статті [35]. Показано, що за умови бінарної координації доцільно введення двох областей взаємних обов'язків, а в разі взаємодії трьох суден для їх координації слід ввести в розгляд дев'ять областей.

У статті [36] представлено доказ умови існування не порожньої множини маневрів розходження пари суден зміною їх швидкостей і приведено аналітичні вирази одержаної умови з урахуванням вибраного режиму гальмування суден.

Показано, що в разі небезпечного зближення пари суден між ними виникає взаємодія, яка детально описана в публікації [37]. Взаємодія направлена на компенсацію виниклого ситуативного збурення маневрами розходження суден.

Стисло розглянута система бінарної координації, яка регулює взаємодію пари суден в частині їх узгодженого маневрування, що веде до збільшення дистанції найкоротшого зближення.

Приведений фрагмент формалізації МПЗЗС-72, як бінарного координатора, для ситуації небезпечного зближення суден в умовах хорошої видимості.

В роботі [38] розглянуто процедуру комп'ютерного графічного визначення оптимального маневру розходження двох суден, що небезпечно зближуються, зміною їх швидкостей за збереження незмінних курсів. Приведений конкретний варіант небезпечної ситуації зближення і реалізація запропонованої процедури.

Процедуру формування стохастичної складової мінімально-допустимої дистанції зближення суден, залежної від радіолокаційних похибок вимірювань і похибок визначення параметрів руху суден, що зближуються, розглянуто у

роботі [39]. Одержано аналітичний вираз для оцінки значення стохастичної складової мінімально допустимої дистанції зближення суден.

У статті [40] приведено опис комп'ютерної програми імітаційного моделювання процесу розходження суден маневром зміни курсу за наявності лінійної навігаційної перешкоди в районі маневрування суден.

Систему координації розходження трьох суден, що небезпечно зближуються, розглянуто у статті [41], яка задовольняє вимогам закону необхідної різноманітності Ешбі. Визначені чотири області взаємних обов'язків суден з урахуванням їх статусів, швидкостей і додаткового параметра. Регламентована поведінка кожного з взаємодіючих суден в першій області взаємних обов'язків.

Залежність кругової безпечної області судна від закону розподілу вірогідності позиційної векторіальної похибки досліджено в статті [42], яка визначає величину курсу ухилення судна під час його розходження з небезпечною ціллю. Характеристикою кругової безпечної області судна є гранично допустима дистанція зближення, яка є сумою детермінованої складової, яка залежить від розмірів судна, та стохастичної складової, що визначається законом розподілу вірогідності позиційної векторіальної похибки.

За умові, що центр кругової безпечної області є обсервованим місцем судна, вибір радіусу стохастичної складової безпечної області судна проводиться за умовою вірогідності попадання істинного місця судна в область близької до одиниці.

Для виконання цієї умови в роботі запропоновано інтегральне рівняння, відносно невідомого радіусу кругової безпечної області судна, який знаходиться в межі інтегрування, а його величина визначається методом послідовних наближень.

В статті також показано залежність радіусу кругової безпечної області від дисперсій складових позиційної векторіальної похибки, на величину яких впливають масштабний та істотний параметри закону розподілу.

В роботі [43] запропоновано процедуру формування недопустимої області курсів одного судна і швидкостей іншого для вибору безпечного маневру розходження в разі, коли швидкість судна, яке міняє курс, є більшою за швидкість іншого судна.

Розглянуто недопустиму область, де в разі поєднання курсу та швидкості відповідна дистанція найкоротшого зближення менша за величиною від гранично допустимої дистанції і зближення суден небезпечне. Межу такої області утворюють точки, для яких дистанція найкоротшого зближення дорівнює гранично допустимій дистанції.

В роботі одержана графічна інтерпретація запропонованої області недопустимих курсів одного судна і швидкостей іншого судна. В разі небезпечного зближення суден для безпечного розходження суден потрібно вибрати параметри ухилення суден, тобто курсу і швидкості таким чином, щоб відповідна їм точка знаходилась на найближчій до початкової точки межі області недопустимих курсів одного судна і швидкостей іншого судна і відстань між згаданими точками була мінімальною.

Структуру дворівневої гібридної системи координації для попередження зіткнень двох и трьох суден, яка побудована на існуючій системі бінарної координації МПЗЗС-72, запропоновано в роботі [44].

В разі виникнення ситуації небезпечного зближення двох суден застосовується перший рівень, а під час небезпечного зближення трьох суден використовується другий рівень.

Першим рівнем в гібридній системі координації запропоновано МПЗЗС-72. Коли виникає ситуація небезпечного зближення двох суден, їх взаємодія визначається бінарним координатором і судна виконують спільний маневр розходження. Координатор на першому рівні аналізує відносну позицію суден, враховує їх статуси і адресує їм координуючі сигнали, що визначають кожному із суден взаємні обов'язки.

В ситуації небезпечного зближення трьох суден використовується другий рівень гібридної системи координації, який для такої ситуації зближення

формує також додаткові сигнали координації. Координатор адресує базовому судну сигнали координації, які визначають його поведінку по відношенню до другого та третього суден, тобто визначають його тип маневру розходження.

В разі співпадіння сигналів координації відносно обох суден, які вимагають поступитися, базове судно має поступитися дорогою суднам маневром розходження спільним для обох суден або двома послідовними маневрами для кожного із них.

В роботі [45] проведено аналіз відповідності форм істинної та відносної траєкторій розходження. В разі, коли швидкість судна менше швидкості цілі визначена залежність форми відносної траєкторії від форми істинної траєкторії, а якщо швидкість судна більшої швидкості цілі, форми істинної та відносної траєкторій співпадають.

Для розходження згідно МПЗЗС-72 вибираються форми істинної траєкторії, а параметри маневру розходження залежать від форми відносної траєкторії розходження, тому розглянуто зв'язок форм відносної та істинної траєкторій розходження. Показано, що двом формам істинної траєкторії стандартної стратегії розходження відповідають чотири форми відносної траєкторії розходження.

Якщо швидкість судна є більшою за швидкість цілі незалежно від сторони істинного ухилення, форми істинної та відносної траєкторій співпадають, що обумовлено пропорційною залежністю відносного курсу від істинного курсу в разі швидкості судна більшої від швидкості цілі.

Якщо швидкість судна менша за швидкість цілі, то залежність відносного курсу від істинного курсу характеризується як інтервалами зростання, так і інтервалами падіння, що обумовлює неоднозначне відображення двох форм істинної траєкторії розходження судна в множину чотирьох форм.

В статті приведено приклади відображення форми істинної траєкторії розходження у множині форм відносної траєкторії розходження, як ухиленням вправо, так і ухиленням курсу вліво. Показано, що в обох випадках величина

інтервалу зростання, як і інтервалу падіння відносного курсу визначається відношенням швидкостей судна і цілі.

Систему попередження зіткнень суден, що забезпечує ідентифікацію початкової ситуації небезпечного зближення у відповідності з вимогами МПЗЗС-72 і розрахунок параметрів стратегії розходження суден, розглянуто в роботі [46].

В разі небезпечного зближення суден визначаються їх взаємні обов'язки згідно вимогам МПЗЗС-72, після чого вибираються параметри безпечного маневру розходження. У зв'язку з цим для синтезу системи попередження зіткнень у відповідності з вимогами МПЗЗС-72 були розроблені алгоритми безпечного розходження суден, для визначення параметрів якого були використані раніш одержані вирази.

В статті розглянуто імітаційну програму, що розроблена для тестування системи попередження зіткнень суден, яка містить модуль формування початкової ситуації небезпечного зближення та модуль програмування одержаного маневру розходження з метою перевірки коректності роботи системи попередження зіткнень суден.

Після формування початкової ситуації небезпечного зближення суден модуль визначення взаємних обов'язків суден відповідно вимогам МПЗЗС-72 використовує алгоритми бінарної координації взаємодії пари суден.

За допомогою імітаційної програми було згенеровано ситуації небезпечного зближення, імітаційне моделювання яких показало коректність роботи системи і доцільність її використання.

В роботі [47] показано, що система бінарної координації, яка реалізована в МПЗЗС-72, не відповідає вимогам закону необхідної різноманітності Ешбі, тому можливі ситуації небезпечного зближення, безпечне розходження в яких не може бути забезпечено бінарною координацією МПЗЗС-72.

В роботі показано, що закон необхідної різноманітності Ешбі виконується, якщо в системі бінарної координації передбачається компенсація

можливого ситуаційного збурення в разі стандартного розходження спільним маневром обох суден або маневром судна з більшою швидкістю.

Ситуаційне збурення компенсується першим способом двома активними суднами, для чого необхідно узгодження маневрів розходження обох суден, що забезпечує збільшення дистанції найкоротшого зближення в разі виконання маневрів розходження суден. Тому для суден, які зближаються на зустрічних курсах необхідна зміна їх курсів в одну сторону (наприклад, збільшення курсів обох суден), а координація маневрів розходження суден за зближення на попутних курсах потребує зміни їх курсів в різні сторони (наприклад, одне судно збільшує курс, а інше судно – зменшує).

Другий спосіб передбачає компенсацію ситуаційного збурення судном з більшою швидкістю, в той час, як інше судно зберігає незмінними свої курс та швидкість, що не потребує необхідності в координації взаємодії суден. Якщо реалізувалася друга область взаємних обов'язків суден, то ситуаційне збурення компенсується екстремим розходженням.

В роботі також запропоновано систему координації взаємодії трьох суден в разі їх небезпечного зближення, в якій враховуються вимоги закону необхідної різноманітності Ешбі і передбачено чотири області взаємних обов'язків суден. Система координації взаємодії трьох суден під час розходження двох суден трансформується в систему бінарної координації.

Зміст і основні особливості та переваги принципу повного керування процесом розходження суден зовнішнім керувальником розглянуто в статті [48]. Таким керувальником може бути, як система керування рухом суден, так і суднова інформаційна система, з тими ж можливостями.

Показано, що основними методами зовнішнього керування процесом розходження суден є формування і використання областей небезпечних значень параметрів руху суден, що зближуються. Найбільш переважними за наявності достатнього водного простору в районі маневрування є області небезпечних значень курсів суден, що зближуються. За наявності навігаційних перешкод, що обмежують можливість зміни курсів суден, в статті пропонується застосування

областей небезпечних значень швидкостей. Також розглянута область небезпечних курсів одного з суден і швидкостей другого судна. Описані процедури оцінки небезпеки ситуації зближення пари суден і вибору маневру розходження за допомогою розглянутих трьох типів областей небезпечних значень параметрів руху суден, що небезпечно зближуються.

Принцип локально незалежного керування процесом розходження розглянуто в статті [49]. Показано, що для безпечного розходження суден необхідна координація їх маневрів розходження за допомогою узагальненого бінарного координатора.

Для ситуацій зближення судна з ціллю запропонована процедура оцінки небезпеки зближення за допомогою області неприпустимих параметрів руху судна. Якщо швидкість судна є більшою за швидкість цілі, то в разі небезпечного зближення за допомогою згаданої області можна вибрати маневр розходження зміною курсу судна. Показана реалізація запропонованої процедури за допомогою комп'ютерної програми. Приведено чисельний приклад оцінки небезпеки зближення судна з ціллю і вибору безпечного маневру розходження зміною курсу судна.

Одержано аналітичні вирази, за допомогою яких можливий розрахунок моментів часу повороту судна для реалізації маневру розходження зміною курсу судна, залежні від показників форми відносної траєкторії.

В роботі [50] розглянуто два типи керування парою суден в умовах небезпечного зближення з ціллю попередження їх можливого зіткнення. Перший підхід до попередження зіткнення суден є загальноприйнятим в судноводінні локально-незалежним керуванням, коли необхідна координація маневрів взаємодіючих суден, що небезпечно зближуються. Тому у статті викладений принцип бінарної координації взаємодії пари суден під час небезпечного зближення у разі їх локально-залежного керування. Вказано методи вибору оптимальної стратегії розходження для цього типу керування.

Приводиться характеристика другого підходу до керування парою суден в ситуації небезпечного зближення, який здійснюється за допомогою принципу

повного керування системою двох суден, що небезпечно зближуються, зовнішнім керувальником. Для цього типу керування розглядається можливість визначення безпечного маневру розходження зміною курсу використанням області небезпечних курсів. Також розглянута можливість безпечного розходження суден зміною швидкості за незмінних курсів, при цьому пропонується використання області небезпечних швидкостей за заданих початкових курсів. Розглянуті переваги зовнішнього керування суднами і можливі перспективи його використання.

Ситуація небезпечного зближення двох суден, що характеризується ситуативним збуренням, значення якого залежить від співвідношення дистанції найкоротшого зближення і гранично допустимої дистанції, аналізується в роботі [51]. Причому ситуативне збурення може приймати значення, що дорівнює одиниці, за якого розходження проводиться стандартним маневруванням, і значення дорівнює двом, що вимагає використання маневру екстреного розходження.

Розглянута система бінарної координації враховує вимогу закону необхідної різноманітності Ешбі, який передбачає відповідність різноманітності наявних курсів ухилення різноманітності можливих небезпечних курсів зближення. Показано, що ця вимога виконується в разі компенсації ситуативного збурення або одночасним маневром обох суден або маневром судна з більшою швидкістю.

Система бінарної координації, яка запропонована в статті, містить два рівні, перший рівень реалізується, коли ситуативне збурення приймає значення, що дорівнює одиниці, і взаємні обов'язки суден визначаються з урахуванням співвідношення статусів і швидкостей, а за значення ситуативного збурення, що дорівнює двійці має місце другий рівень і передбачено екстрене маневрування обох суден.

В разі зближення двох суден з однаковими статусами і швидкостями їх взаємні обов'язки визначаються тим, чи є курси зближення зустрічними або попутними.

В роботі [52] запропоновано процедуру відображення небезпечної області парних курсів двох суден, за яких дистанція найкоротшого зближення менше гранично допустимої дистанції. Розглянуто графічний спосіб визначення безпечних курсів ухилення в разі небезпечного зближенні трьох суден.

Спосіб аналітичного опису безпечної області судна складної форми і розрахунку її розмірів без урахування габаритів судна запропоновано в роботі [53]. Розрахунок розмірів безпечної області здійснювався в припущенні, що векторіальна позиційна похибка підкоряється нормальному закону розподілу.

В роботі [54] одержано формулу, яка характеризує зміну дистанції найкоротшого зближення судна з ціллю залежно від значення курсу судна. Показано, що знак першої похідної дистанції найкоротшого зближення визначається відношенням швидкостей судна і цілі, а також різницею між пеленгом на ціль і відносним курсом. Коректність одержаної аналітичної залежності підтверджена за допомогою імітаційного моделювання.

Процедуру вибору оптимальної стратегії розходження групи суден, що небезпечно зближуються, зміною курсу в разі їх керування СКРС запропоновано в роботі [55]. Розглянуто графічний спосіб комп'ютерного моделювання для визначення оператором параметрів оптимального маневру розходження групи суден.

У статті [56] викладено спосіб імітаційного моделювання процедури вибору оптимальної форми судової безпечної області. Розглянуто п'ять форм безпечної області і визначена оптимальна форма, що забезпечує мінімальне ухилення судна для розходження. Приведено два приклади використання процедури моделювання для визначення середнього кута ухилення.

Спосіб вибору безпечних курсів ухилення суден за умови зовнішнього керування за допомогою областей небезпечних курсів запропоновано в роботі [57]. Показано, що інерційність судна під час повороту веде до зниження дистанції найкоротшого зближення до величини меншої гранично допустимої відстані.

Обґрунтовано залежність для розрахунку уточненого значення гранично допустимої відстані з урахуванням інерційності судна, і описана процедура вибору маневру зміни курсу одного з суден за незмінних параметрів руху іншого судна.

Робота [58] присвячена ситуативному збуренню і його характеристикам, які спільно визначають значення збурення в різних ситуаціях. Одержано аналітичні залежності, що характеризують області постійних значень ситуативного збурення і запропоновано графічний спосіб оцінки його значення залежно від дистанції між суднами, гранично допустимої дистанції і курсу судна з більшою швидкістю. Приведено приклад початкових ситуацій зближення суден, відповідних значенню ситуативного збурення, що дорівнює 1 і 2.

Ситуацію небезпечного зближення суден в стиснених водах розглянуто в роботі [59], коли неможливе безпечне розходження зміною курсу. Показано, що за мови зовнішнього керування попередження можливого зіткнення суден досягається маневром зміни швидкостей суден за допомогою областей небезпечних швидкостей.

Одержано необхідні аналітичні вирази для формування областей небезпечних швидкостей. Сформульована умова існування маневру розходження зміною швидкості з урахуванням інерційних характеристик суден.

В статті [60] розглянуто систему бінарної координації, яка регулює взаємодію пари суден в ситуації небезпечного зближення в разі їх стандартного розходження маневруванням зміною курсу судна.

Показано, що під час формування системи бінарної координації необхідно враховувати вимогу закону необхідної різноманітності Ешбі. Одержано умови, що задовольняють вимогам закону необхідної різноманітності, які полягають в компенсації ситуативного збурення або обома судами, або судном з більшою швидкістю.

Спосіб розходження суден, що небезпечно зближуються, зниженням швидкостей на незмінному курсі запропоновано в роботі [61]. Передбачається,

що гальмування суден проводиться із заданими швидкостями ухилення і вимагається знайти момент часу початку гальмування суден, коли мінімізуються втрати їх ходового часу.

Розглянуто процес зниження швидкості одного судна активним гальмуванням, а другого – пасивним гальмуванням. Одержані аналітичні вирази для розрахунку оптимальних параметрів маневру розходження.

В статті [62] показано, що оцінка рівня небезпеки зближення суден і вибір маневру розходження суден у разі існування загрози їх зіткнення можливі, якщо використовується область неприпустимих параметрів руху базового судна, одержаної за допомогою умови безпечного розходження.

Одержано аналітичні вирази для меж області при відносному ухиленні судна вправо і вліво, а також приведений графічний вид області неприпустимих параметрів.

Описано процедури оцінки ситуації зближення суден і оперативного вибору маневру розходження.

Вплив інерційних характеристик поворотності судна на величину дистанції найкоротшого зближення суден під час виконання маневру розходження зміною курсу проаналізовано в статті [63]. Запропоновано ситуацію, коли судно виконує поворот на курс ухилення, а ціль зберігає незмінні параметри руху.

Використана модель обертального руху судна з постійною кутовою швидкістю повороту. Одержано аналітичні вирази характеристик повороту і величина зменшення дистанції найкоротшого зближення. Показано вплив цієї обставини на розміри області небезпечних курсів і запропоновані рекомендації по забезпеченню безпечного розходження суден в таких ситуаціях. Приведено чисельний приклад, підтверджуючий коректність отриманих результатів.

Як показано в роботі [64], в разі зовнішнього керування процесом розходження суден їх сумісну стратегію розходження вибирає система керування рухом суден і показано, що у ряді ситуацій такою стратегією є

одночасне зниження швидкостей обох суден активним або пасивним гальмуванням.

У статті розглядається вибір оптимальних швидкостей ухилення суден, одного активним, а другого пасивним гальмуванням, за умови початку гальмування в нульовий момент часу. Критерієм оптимальності є можливі втрати ходового часу суден.

Одержано аналітичні вирази і алгоритм розрахунку оптимальних швидкостей ухилення суден, розроблено комп'ютерну програму розрахунку оптимального маневру, а коректність одержаних результатів розрахунку підтверджено імітаційним моделюванням.

В стиснених районах інтенсивного судноплавства, як показано в роботі [65], виникають ситуації небезпечного зближення трьох суден, які не координуються МПЗС-72. Тому в статті розглянута ситуація небезпечного зближення трьох суден і показано, що для попередження зіткнення система координації для кожного із суден вимагає певного типу поведінки (маневрування або збереження параметрів руху). Судно, яке оперує, для попередження зіткнення формує гнучку стратегію розходження, яка містить пріоритетний маневр, що враховує тип поведінки взаємодіючих суден, який вимагається координатором, і резервний маневр для випадку ігнорування партнером своїх обов'язків.

Для попередження зіткнення переважним є маневр зміни курсу судна. Тому розрахунок параметрів маневру ухилення вимагає урахування відповідності форм траєкторій істинного і відносного руху.

Ситуацію небезпечного зближення судна з двома цілями, коли розходження з ними загальним маневром неможливе, розглянуто в статті [66]. Пропонується безпечне розходження двома послідовними маневрами: зміною курсу з першою найближчою цілю і зміною швидкості з другою.

Запропоновано аналітичні вирази і алгоритм розрахунку курсу ухилення, моменту часу початку зниження швидкості активним гальмуванням і швидкість

розходження з другою цілю. Приведено чисельний приклад і його графічна ілюстрація.

Аналітичні вирази розрахунку гранично допустимої дистанції зближення для безпечних доменів еліптичної і складної форм одержано в роботі [67]. Представлено графічну залежність гранично допустимої дистанції зближення від початкового пеленга на ціль і її курсу для вказаних форм безпечних доменів.

Показано, що залежності гранично допустимої дистанції зближення розглянутих форм доменів від курсу цілі мало відрізняються один від одного і доцільним є застосування тільки домену еліптичної форми.

В роботі [68] розглянуто вибір стратегії екстреного розходження судна у випадку надмірного зближення з урахуванням кутової швидкості повороту судна. Показано, що оптимальною стратегією розходження є поворот судна з максимальною кутовою швидкістю убік від цілі до виходу на курс, що дорівнює пеленгу з цілі на судно, а потім рух таким курсом, поки дистанція між судном і ціллю не збільшиться до безпечного значення. Приведено приклади маневрів екстреного розходження суден за допомогою імітаційного моделювання.

В роботі [69] запропоновано складну стратегію розходження судна з ціллю, що небезпечно зближується, за ситуації, коли в районі маневрування знаходиться розподілена лінійна навігаційна небезпека, причому складна стратегія містить дві ділянки виходу на задану траєкторію. Приведена аналітична умова визначення необхідності застосування стратегії розходження з одним або двома ділянками виходу судна на задану траєкторію.

Одержано формули для розрахунку моментів часу повороту судна на першу і другу ділянки виходу на задану траєкторію в ситуації розходження судна з небезпечною ціллю за наявності в районі маневрування лінійної розподіленої навігаційної небезпеки.

Формалізація ситуації небезпечного зближення суден проведена в роботі [70]. Приведено формули для розрахунку параметрів відносного руху суден залежно від параметрів їх істинного руху.

Одержані аналітичні вирази для розрахунку значень часу і дистанції найкоротшого зближення пари суден. Формалізована умова зближення суден залежно від параметрів ситуації їх зближення.

В роботі [71] розглянуто комбінований маневр розходження судна з двома небезпечними цілями послідовною зміною курсу, а потім зниженням швидкості пасивним гальмуванням. Одержано аналітичні вирази і алгоритм розрахунку параметрів безпечного маневру розходження. Для ситуацій розходження судна з двома цілями комбінованим маневром послідовної зміни курсу і швидкості запропонована процедура формування області небезпечних значень параметрів стратегії розходження.

Одержано вирази для формалізації меж області неприпустимих значень курсів і швидкостей судна комбінованого маневру за умови зниження швидкості пасивним гальмуванням. Приведений чисельний приклад формування області неприпустимих параметрів комбінованого маневру розходження судна зниженням швидкості пасивним гальмуванням.

Спосіб формування області неприпустимих значень курсу одного з суден і швидкості іншого судна з урахуванням його інерційно-гальмівних характеристик в разі зовнішнього керуванні процесом їх розходження запропоновано в роботі [72]. Залежно від параметрів ситуації небезпечного зближення і режиму гальмування судна одержано аналітичні вирази для розрахунку меж області неприпустимих значень курсу і швидкості суден, що зближуються.

Представлено результати застосування комп'ютерної програми для формування області небезпечних курсів одного судна і швидкостей другого судна з урахуванням інерційно-гальмівних характеристик судна, що знижує швидкість. Показано приклади вибору безпечної стратегії розходження суден з урахуванням активного і пасивного гальмування.

В роботі [73] розглянуто зміст і основні переваги принципу зовнішнього керування процесом розходження суден. Показано, що основними методами зовнішнього керування процесом розходження суден є формування і

використовування областей небезпечних значень параметрів руху суден, що зближуються, до яких відносяться області небезпечних курсів і їх небезпечних швидкостей, за допомогою яких можливі оцінка небезпеки ситуації зближення і вибір маневру розходження. Також розглянута область небезпечних курсів одного з суден і швидкостей другого судна.

Форми істинної траєкторії розходження і форми відносної траєкторії розходження для випадку ухилення судна з поверненням на програмну траєкторію руху розглянуто в статті [74]. Показано, що за швидкості судна більшої за швидкість цілі форми істинної і відносної траєкторій співпадають. Для випадку, коли швидкість судна менше за швидкість цілі визначена залежність відносної траєкторії розходження від істинної траєкторії. Досліджені закономірності відображення траєкторії судна ухиленням управо в множину форм відносних траєкторій.

В роботі [75] приведені аналітичні вирази перетворення безпечної області судна з простору відносного руху в простір істинного руху. Запропоновано процедуру відображення віртуальних областей на електронній карті і розроблено спосіб розходження судна з декількома небезпечними цілями, який відмінний наочністю, оперативністю і простотою. Приведено приклад вибору безпечної стратегії розходження судна зміною курсу з двома небезпечними цілями застосуванням віртуальних областей кругової форми.

Процедуру оцінки небезпеки зближення судна із ціллю за допомогою областей неприпустимих параметрів руху судна запропоновано в роботі [76]. В разі небезпечного зближення за допомогою згаданої області можна вибрати маневр розходження зміною курсу судна, якщо його швидкість більша за швидкості цілі. Якщо швидкість судна менша за швидкість цілі розглянуто спосіб визначення курсу ухилення судна для попередження можливого зіткнення. Якщо попередження зіткнення не можна запобігти зміною курсу через обмеженість акваторії, то передбачене формування області неприпустимих значень параметрів руху судна, за допомогою якої можливо

вибрати маневр розходження зміною швидкості. Показана реалізація пропонуванних процедур за допомогою комп'ютерної програми.

В роботі [77] приведена графічна залежність гранично допустимої дистанції зближення від ракурсу суден, що зближуються, для домену прямокутної форми. За допомогою комп'ютерної програми сформована область небезпечних значень курсів для вказаного домену.

Для заданої ситуації небезпечного зближення вибраний маневр безпечного розходження відносним ухиленням управо. Підтверджена коректність одержаного маневру.

Форми істинної і відносної траєкторій розходження для випадку ухилення судна з поверненням на програмну траєкторію руху досліджено в роботі [78]. Встановлено, якщо швидкість судна перевершує швидкість цілі, то форми істинної і відносної траєкторій співпадають. Визначена залежність відносної траєкторії розходження від істинної траєкторії для ситуацій, коли швидкість судна менша за швидкість цілі. Досліджено закономірності відображення істинної траєкторії розходження судна ухиленням вліво в множину форм відносних траєкторій.

У статті [79] приведено області безпечних параметрів ухилення і виходу, за якими можливе оперативне визначення параметрів маневру розходження для заданої ситуації небезпечного зближення. Розроблено процедуру оперативного визначення маневру розходження судна з ціллю за допомогою імітаційної комп'ютерної програми, що використовує області безпечних параметрів ухилення і виходу.

Для заданої ситуації небезпечного зближення приведений приклад вибору маневру розходження за допомогою розглянутих областей, параметри якого розраховані комп'ютерною програмою.

Спосіб розходження судна з двома небезпечними цілями послідовними ухиленнями з програмної траєкторії руху в разі локально-незалежного керування процесом розходження розглянуто в роботі [80]. Приведено відомості про розробку комп'ютерної програми вибору маневру розходження судна з

двома небезпечними цілями і його імітаційному моделюванню. Приведено приклад вибору оптимального маневру розходження для заданої ситуації небезпечного зближення за допомогою комп'ютерної програми і приведені результати його імітаційного програвання.

В роботі [81] показано, що для домену, який має форму відмінну від кругової, гранично допустима дистанція зближення не є постійною, а залежить від ракурсу суден і пеленгу. Для домену еліптичної форми одержано аналітичну залежність гранично допустимої дистанції від параметрів ситуації зближення суден і запропоновано процедуру її розрахунку.

Процедуру формування області неприпустимих значень параметрів ухилення, яка призначена для визначення безпечних значень часу і курсу ухилення судна приведено в роботі [82]. Одержано аналітичні вирази для розрахунку меж області безпечних курсів ухилення і часу повороту на ділянку виходу за заданого курсу виходу. Приведено приклад оперативного визначення параметрів маневру розходження в разі використання розглянутих областей, розрахованих за допомогою комп'ютерної програми.

У статті [83] приведено аналітичну умову існування не порожньої множини маневрів розходження судна з небезпечною ціллю з урахуванням лінійної навігаційної перешкоди. Показана обмеженість застосування способу аналітичного урахування навігаційних небезпек під час вибору безпечної стратегії розходження. Запропоновано спосіб використання електронної карти для вибору безпечного маневру розходження судна з ціллю за наявності навігаційних перешкод.

Метод розрахунку меж області неприпустимих значень швидкостей двох суден, що зближуються, запропоновано у статті [84], за допомогою якого можлива оцінка небезпеки ситуації їхнього зближення і вибір маневру розходження зміною швидкостей в разі зовнішнього керування процесом їхнього розходження. Розглянуто ситуацію розходження суден під час зниження швидкостей пасивним гальмуванням.

У роботі [85] запропоновано спосіб формування областей неприпустимих параметрів руху суден для оцінки небезпеки ситуації їхнього зближення і вибору маневру розходження. Одержано вирази меж областей неприпустимих значень курсу одного з суден і швидкості іншого судна в разі зовнішнього керування процесом розходження. Приведено чисельні приклади.

Спосіб розходження судна з двома небезпечними цілями маневром послідовних ухилень для локально-незалежного керування запропоновано в роботі [86]. Одержано аналітичні вирази для розрахунку параметрів маневру розходження. Приведено приклад розрахунку параметрів маневру розходження комп'ютерною програмою і приведені результати його програвання.

Для оцінки рівня небезпеки ситуації зближення суден в роботі [87] запропоновано спосіб формування областей неприпустимих параметрів їх руху. Одержано формалізацію меж областей неприпустимих значень курсів суден і їхніх швидкостей в разі локально-незалежного і зовнішнього керування процесом розходження.

В роботі [88] розглянуто принцип зовнішнього керування процесом розходження суден і його основні переваги. Показано, що основними методами зовнішнього керування процесом розходження суден є області небезпечних курсів суден, що зближуються, і їхніх небезпечних швидкостей, за допомогою яких можливі оцінка небезпеки ситуації зближення і вибір маневру розходження. В разі вибору безпечних курсів розходження суден за допомогою області небезпечних курсів запропонована процедура урахування точкової навігаційної перешкоди.

Принцип локально-незалежного керування процесом розходження розглянуто в роботі [89]. Показано, що для безпечного розходження суден необхідна координація їх маневрів розходження за допомогою узагальненого бінарного координатора, яким є МПЗЗС-72. Запропоновано спосіб синтезу повної стратегії розходження базового судна, яка передбачає наявність другої цілі в ситуації небезпечного зближення і враховує можливі варіанти розвитку ситуації зближення і вимоги системи бінарної координації.

В роботі [90] одержано аналітичні вирази перетворення межі безпечної області з простору відносного руху в простір істинного руху. Приведено результати дослідження властивостей віртуальних областей, які дозволяють використовувати їх в процесі розходження. Запропоновано процедуру відображення віртуальних областей на електронній карті і розроблено спосіб розходження судна з декількома небезпечними цілями за наявності суден, що заважають, і навігаційних перешкод, відмінний наочністю, оперативністю і простотою.

Для ситуацій зближення судна з ціллю в роботі [91] запропоновано процедуру оцінювання небезпеки зближення за допомогою області неприпустимих параметрів руху судна. Якщо швидкість судна більша за швидкість цілі, то в разі небезпечного зближення за допомогою згаданої області можна вибрати маневр розходження зміною курсу судна. У разі, коли швидкість судна менша за швидкість цілі, розглянутий спосіб визначення курсу ухилення судна для попередження можливого зіткнення. Показана реалізація пропонуванних процедур за допомогою комп'ютерної програми.

В роботі [92] показано, що основним методом зовнішнього управління процесом розходження суден є області небезпечних курсів суден, що зближуються, за допомогою яких проводиться вибір маневру розходження пари суден. Показано метод вибору безпечних курсів розходження в ситуації небезпечного зближення чотирьох суден. Приведено чисельний приклад і результати імітаційного моделювання.

Аналіз впливу інерційних характеристик поворотності судна на величину дистанції найкоротшого зближення суден під час виконання маневру розходження суден зміною курсу приведено в роботі [93]. Розглянуто ситуацію, коли базове судно виконує поворот на курс ухилення, а ціль зберігає незмінні параметри руху. Застосована модель обертального руху судна з постійною кутовою швидкістю повороту. Показано вплив інерційності судна на розміри області небезпечних курсів і запропоновано рекомендації щодо забезпечення

безпечного розходження суден в таких ситуаціях. Приведено чисельний приклад, підтверджуючий коректність одержаних результатів.

В роботі [94] розглянуто основи взаємозв'язку форм істинної і відносної траєкторій розходження, причому показано, що двом формам істинної траєкторії розходження в загальному випадку відповідає чотири форми відносної траєкторії. Вказується, що форма відносної траєкторії розходження визначає вид аналітичних виразів розрахунку параметрів стратегії розходження.

Для однієї з форм відносної траєкторії розходження визначені моменти часу повороту судна для реалізації безпечного маневру попередження зіткнення. Приведено приклад з використанням комп'ютерної програми.

Істинна траєкторія розходження судна з ціллю в разі небезпечного зближення і її форми залежно від сторони ухилення розглянуто в роботі [95]. Показано, що двом формам істинної траєкторії розходження в загальному випадку відповідають чотири форми відносної траєкторії розходження, причому приведено чисельні приклади параметрів ситуації зближення, за яких реалізується кожна з форм відносної траєкторії. Одержано аналітичні вирази, за допомогою яких можливий розрахунок моментів часу повороту судна для реалізації маневру розходження, залежні від показників форми відносної траєкторії.

В роботі [96] для ситуацій небезпечного зближення судна з ціллю у разі потреби маневром розходження зниженням швидкості судна запропоновано спосіб вибору параметрів маневру активним гальмуванням за допомогою області неприпустимих параметрів руху судна. Одержано аналітичні вирази визначення оптимальної швидкості розходження, показана реалізація пропонованого способу за допомогою комп'ютерної програми. Коректність пропонованого способу підтверджена імітаційним моделюванням.

Аналітичні вирази меж областей небезпечних курсів і небезпечних швидкостей, за допомогою яких здійснюється формування даних областей в разі зовнішнього керування процесом розходження суден приведено в роботі [97]. Розглянуто процедури оцінки небезпеки зближення суден і маневру

їхнього розходження за допомогою області небезпечних курсів і області їхніх небезпечних швидкостей.

Одержано формули меж області неприпустимих значень курсів одного судна і швидкостей іншого судна і запропоновано процедуру її графічного відображення.

В роботі [98] для ситуації зближення судна з двома цілями запропоновано спосіб формування областей неприпустимих значень параметрів руху судна відносно кожної з них. Одержано процедуру оцінювання небезпеки виниклої ситуації зближення по кожній цілі застосуванням сформованих областей.

Показано можливість вибору маневру розходження загальним ухиленням від двох цілей за допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху судна. Як приклад розглянуті три ситуації зближення судна з двома цілями.

Теоретичні і практичні дослідження щодо проблеми безпечного розходження суден інтенсивно проводяться і за кордоном. У роботах закордонних дослідників [99-105] приведено аналіз МПЗС-72 із пропозиціями щодо їхнього вдосконалення, розглянуто питання виявлення факту надмірного зближення суден, формалізації основних понять МПЗС-72 в частині виявлення небезпеки зіткнення і позиції, коли слід починати маневр розходження. Формульні вирази розрахунку гранично допустимої дистанції найкоротшого зближення в умовах зниженої видимості запропоновано в роботах [100,101,104,105], а також приведено математичне обґрунтування оптимального керування судном в разі загрози зіткнення в ситуаціях небезпечного зближення.

Одним з найактуальніших напрямів дослідження по проблематиці попередження зіткнень суден, як зазначається в роботах [106–108], є аналітичний опис взаємодії суден в ситуації небезпечного зближення для формування стратегії розходження. В роботах приводяться основні підходи і засоби, що їх використано для аналітичного опису взаємодії суден в процесі розходження, а також показано, що для вирішення поставленої задачі використовуються методи оптимальної фільтрації, загальної теорії регулювання,

статичних і диференціальних ігор. Взаємодія суден в ситуації небезпечного зближення в різних підходах трактується як конфліктна, так і безконфліктна.

Метод «Neural fuzzy system» для оцінки ризику зіткнення суден, який одержано на основі результатів останніх досліджень проблем безпеки морського судноплавства, пропонується в роботі [109]. Показано, що створення нового типу системи Neural network system може бути здійснено з урахуванням переваги штучної нейронної мережі системи «Fuzzy» в порівнянні з традиційними методами, що показали отримані в роботі результати.

З метою підвищення безпеки та ефективності керування суднами, як повідомляється в роботі [110], була розроблена система ATSM (Autonomous Traffic Management System), в якій використовуються дані АІС з судна – тренажера Shioji Maru, а також дані радіолокаційного спостереження про переміщення суден в Токійській затоці для оцінювання умов судноплавства. Система ATSM за допомогою програми Forward Dynamics Programming проводить розрахунок оптимальних траєкторій переміщення всіх суден в районі. Визначено, що в разі використання оптимального шляху, який розрахований системою ATSM, час входження в Токійську затоку скорочується на 4%.

У роботі [111] аналізуються переваги та недоліки різних методів розрахунку індексу ризику зіткнення суден, який є основним показником попередження зіткнень суден. Запропоновано модель оцінки ризику зіткнення суден на основі комплексної площини, якою можуть бути компенсовані недоліки широко використовуваної моделі оцінки, запровадженої Kearon J. Згідно розглянутої моделі розрахунок індексу ризику зіткнення будується для ситуацій у вигляді тривимірного зображення просторової кривої індексу ризику, для чого потрібен одиночний мікрокомп'ютерний чіп. Пропонований метод має сенс використовувати в системах прийняття рішень забезпечення безаварійного судноводіння.

В роботі [112] запропоновано новий фузі-метод, що є додатком до засобів можливості ухилення від зіткнення суден системи СУРС/АІС, для забезпечення

безпеки судноплавства. В Морську географічну інформаційну систему MGIS (Marine Geographic Information System) вводяться данні СУРС спільно з даними АІС, що забезпечує можливість розрахунку даних про область знаходження судна та інерційних сил, що діють на нього. Одержана інформація також використовується для визначення моделі захисного кола і небезпечного індексу. Використанням аналітичної моделі морської системи GIS може бути отримано точне прогнозування часу і позиції зіткнення. Завдяки запропонованому методу оператор СУРС одержує можливість прийняття рішень щодо попередження зіткнення суден.

У роботах [113-115] показано використання методів теорії оптимального керування для синтезу оптимального маневру розходження за заданим критерієм у ситуації виникнення загрози зіткнення суден.

Ситуацію розходження зустрічних суден розглянуто в статті [113], для формалізації якої і вибору безпечного маневру розходження застосовано методи теорії оптимального керування.

В роботі [114] приведено рішення задачі розходження зміною курсу за допомогою чисельного методу, що використовує процес квазіоптимального рішення з нелінійною оптимізацією. В статті також розглянуто можливість виконання судном послідовно в часі декількох маневрів розходження у разі наявності декількох небезпечних цілей.

Результати аналізу ситуації небезпечного зближення декількох суден приведено в роботі [115], що забезпечили розробку алгоритму розходження, якому притаманне урахування інерційних характеристик суден, вимог МПЗЗС-72 в частині визначення пріоритетів суден в разі небезпечного зближення, навігаційну обстановку, а також геометричні співвідношення їхнього взаємного розташування.

Процес керування рухом судна, як зазначається в роботах [116–118], характеризується нестационарними та нелінійними параметрами, є багатовимірним, а задача вибору оптимального маневру розходження носить ігровий характер, що обумовлює формалізацію й рішення цієї задачі як дуже

складне завдання, причому в згаданих роботах висвітлені основні напрями його розв'язання.

Принцип дії автономної суднової системи ухилення від зіткнення СА (Collision avoidance) та його теоретичне обґрунтування розглянуто в роботі [119], в якій приведено алгоритм ухилення від зіткнення та проаналізовані Правила ухилення від зіткнення COLREG. Вказується, що дослідження щодо автоматизації керування судном можуть носити класичний підхід, заснований на застосуванні математичних моделей та алгоритмів, або комп'ютерний характер, який базується на використанні штучного інтелекту, і згадані підходи можуть бути викладені у відповідних категоріях.

Базову модель процесу розходження судна з цілями у ситуації небезпечного зближення та загрози зіткнення із використанням моделі гри декількох об'єктів розглянуто у статті [120]. Запропонована модель характеризується нелінійними рівняннями параметрів стану та нелінійними, змінюваними у часі їх обмеженнями. В першому наближенні модель керування процесом розходження базується на моделі багатокрокової матричної гри, яка формалізована двоїстою задачею лінійного програмування. Для визначення безпечної траєкторії власного судна була розроблена комп'ютерна програма ігрового керування GSC, за допомогою якої отримані аналітичним чином результати були перевірені та підтверджені у реальній навігаційній обстановці.

Положення пунктів 2 і 3 Правила 17 МПЗЗС-72 щодо запобігання зіткненню суден на морі коментуються в роботі [121], в якій обговорюється можливість застосування принципу – Principle of Confidence за спільних дій в ситуації ухилення від зіткнення в процесі розбору випадку в Морському арбітражному суді.

Пропонується, що пункт 2 Правила 17 повинен мати перевагу перед його пунктом 3, тому, що розміри суден і їх швидкості збільшилися і потрібно мати більше часу і більшу відстань до їх повної зупинки.

Штучну нейронну мережу синтезу безаварійного керування в ситуаціях небезпечного зближення суден в морі описано в статті [122], в якій також

викладено шість методів оптимальної теорії ігор. Показано, що можливе визначення безпечної траєкторії руху власного судна під час розходження з іншими суднами незалежно від стану видимості в разі застосування оптимальних алгоритмів керування методами теорії ігор. Порівняно безаварійне керування судном у ситуації небезпечного зближення методами антагоністичної та кооперативної ігор, а також приведено аналіз багатокрокових позиційних некооперативних та кооперативних ігор. Одержані теоретичні результати були перевірені прикладами комп'ютерного моделювання ситуації зближення судна із вісьмома зустрічними цілями.

В роботі [123] описується трирівневі моделюючі схеми, що базуються на технології синтезу, призначені для ухилення від зіткнення з поодиноким судном за допомогою оціночної системи дій. Процедури перетворення координат і геометрична модель використовуються в принципі функціонування модулів, що формалізують траєкторію руху судна і його параметри руху. Завдяки цьому визначаються оцінка ризику зіткнення і параметри маневру ухилення від зіткнення.

Контроль і керування рухом судна розглядаються у статті [124], як багаторівнева система, що керує судновими системами під час його переходу між портами. Судновим підсистемам відповідають функціональні шари контролю розглянутої системи.

В ситуаціях небезпечного зближення декількох суден судноводіям бажано мати інформацію про безпечні траєкторії розходження, на що вказується в роботі [125], в якій розглянуто різні способи запобігання зіткненню суден, до яких відносяться радіолокаційні, оглядові і УКХ-радіохвильові, а також із застосуванням домену судна, генетичного алгоритму і теорії нечітких множин. Застосування цих методів коректно в разі бінарних взаємодій між парою суден. Тому в роботі для попередження зіткнень групи суден запропоновано розподілений локальний алгоритм пошуку, в якому кілька суден спілкуються методом УКХ-радіохвиль один з одним в межах певної області. Алгоритм

пошуку обчислює ризик зіткнення, виходячи із інформації, одержаної від сусідніх суден.

Вдосконалення методів зовнішнього керування рухом суден в районах контролю СУРС розглянуто в статті [126]. За допомогою експертних знань на принципах повного зовнішнього керування процесом розходження суден засновані підходи формування безпечних траєкторій руху суден. Наряду з цим також пропонується спосіб планування траєкторій розходження суден із використанням алгоритмів їх узгодження без зовнішнього керувальника шляхом попередніх домовленостей, поки не буде знайдено прийнятне для всіх суден коректне рішення.

У даний час згадана процедура тестується моделюванням на декількох випробувальних стендах, причому оптимальне рішення досягається в разі швидкого процесу сходження та забезпечує безаварійні траєкторії розходження, про що свідчать результати моделювання.

З проведеного аналізу випливає, що центральним питанням проблеми є формалізація процесу розходження суден та розробка способу вибору оптимального маневру їхнього розходження. Це питання містить безліч різних аспектів, під час вирішення яких повинні враховуватись численні істотні фактори. До них належать такі:

1. Концептуально-аналітичний опис взаємодії суден у процесі їх розходження, за допомогою якого за початковою ситуацією зближення можна отримати однозначні стратегії поведінки кожного з суден.

2. Структура стратегії розходження суден, яка передбачає можливість ухилення судна з програмної траєкторії руху для безпечного розходження з ціллю із подальшим поверненням на задану траєкторію. Така стратегія характеризується в найпростішому випадку шістьма параметрами: трьома курсами та трьома моментами їх реалізації.

3. Врахування навігаційних небезпек у районі розходження судна з ціллю, що скорочує безліч безпечних маневрів розходження.

4. Наявність безлічі суден у районі небезпечного зближення оперуючого судна з однією або декількома цілями та врахування цієї обставини під час формування безпечного маневру розходження.

5. Основні типи маневрів розходження з небезпечною ціллю: зміною курсу та зміною швидкості.

6. Врахування інерційних характеристик повороткості судна під час вибору оптимальної стратегії розходження.

## 1.2 Вибір основних напрямів наукового дослідження та обґрунтування вибору теми дисертаційного дослідження

За кожним із перелічених напрямів вирішення проблеми запобігання зіткнень суден, які приведені в попередньому підрозділі, досягнуто значних результатів. Однак під час моделювання процесу розходження суден, що знаходяться на невеликих відстанях, виявилось, що в разі безпечного ухилення небезпека зіткнення може знову виникнути на етапі повернення суден на програмні траєкторії їхнього руху.

Для запобігання можливим зіткненням у таких ситуаціях суднам слід узгоджувати свої дії на етапі виходу на програмну траєкторію, що не передбачено головним нормативним документом – Міжнародними правилами запобігання зіткнень суден (МППЗС-72). Причому найефективнішим є одночасне керування обома суднами відносним курсом шляхом зміни власних істинних курсів. Така спільна стратегія може бути оптимізована за критерієм мінімуму ризику зіткнення, для чого необхідно отримати аналітичну залежність швидкості зміни відносного курсу від параметрів повороткості суден та початкової відносної позиції.

Тому метою дисертаційного дослідження є пошук такої моделі для подальшої розробки процедури вибору узгодженої зміни курсів суден, що

забезпечує їхнє безпечне повернення на програмну траєкторію руху. Цією обставиною визначено вибір теми даного дисертаційного дослідження.

Враховуючи розглянуті підходи, щодо коректності вибору маневру розходження в різних ситуаціях небезпечного зближення суден та необхідності уточнення стратегії розходження на етапі повернення суден на програмну траєкторію руху в ситуаціях надмірного зближення, слід сформулювати перелік питань, без яких неможливо повною мірою висвітлити тему даного дисертаційного дослідження.

Насамперед слід отримати процедуру визначення моменту часу початку етапу повернення судна на програмну траєкторію руху в ситуації розходження суден, що знаходяться на невеликих дистанціях.

В такому разі слід врахувати наявність навігаційних обмежень і суден, що заважають, на етапі ухилення судна. Вихідна ситуація на момент часу початку етапу повернення судна на програмну траєкторію руху характеризується відносною позицією судна й цілі та їх параметрами руху.

За значеннями характеристик згаданої ситуації залежно від наявності чи відсутності координації взаємодії судна та цілі на етапі повернення на програмну траєкторію вибирається тип маневру повернення та розраховуються його параметри.

Визначальним у такому разі є характер зміни дистанції найкоротшого зближення між суднами до їхнього виходу на програмні траєкторії руху. У свою чергу, зміни дистанції найкоротшого зближення між суднами за заданої вихідної ситуації однозначно визначається збільшенням відносного курсу.

Тому потрібно визначити вплив зміни параметрів руху суден на збільшення відносного курсу, тобто необхідно дослідити залежності збільшення відносного курсу від зміни істинного курсу кожного зі взаємодіючих суден і виявити вплив зміни істинних курсів обох суден на збільшення відносного курсу.

Також необхідно знайти залежність зміни відносного курсу в часі за заданих кутових швидкостей повороту кожного із суден, що дозволить провести

аналіз тенденції зміни дистанції найкоротшого зближення та можливості безпечного повернення на програмну траєкторію руху.

Отримані залежності збільшення відносного курсу від зміни параметрів руху взаємодіючих суден дозволяють визначити, у яких вихідних ситуаціях повернення на програмну траєкторію руху доцільно застосування тих чи інших парних стратегій суден.

У ситуаціях складних стратегій повернення судна на задану траєкторію, коли враховується як динаміка судна, так і наявність навігаційних небезпек та заважаючих суден, пропонований аналітичний апарат може виявитися не зовсім ефективним, через те що в ситуаціях критичного зближення, які визначаються другим та третім пунктами правила 16 МППЗС-72, поведінка судна і цілі не координуються, що веде до збільшення ризику зіткнення.

Тому виникає необхідність розробки методу оперативного керування виходом на програмну траєкторію за станом поточної ситуації, який враховує передбачувані траєкторії руху судна, цілі та суден, що заважають.

В такому разі враховується, чи є координованими рухи судна та цілі, з чого можна зробити висновок про їх стратегії повернення на задану траєкторію, що дозволяє розраховувати поточне положення судна та цілі та, як наслідок, поточну дистанцію між ними. За наявності судна, що заважає, поточна дистанція прораховується, виходячи з припущення незмінності параметрів руху цілі. Якщо є навігаційна небезпека, то виділяється найбільш небезпечна точка, що характеризує її, і прораховується поточна дистанція.

Для вибору безпечної стратегії повернення судна на програмну траєкторію руху необхідно визначити тип стратегії та її допустимі параметри, а потім прорахувати значення дистанції між судном та ціллю через задані інтервали часу до досягнення судном заданої траєкторії. З отриманої множини значень вибирається мінімальне і порівнюється з гранично допустимим.

Якщо мінімальне значення дистанції не менше за гранично допустиме значення, то стратегія безпечна, інакше за різницею мінімального та гранично допустимого значень дистанції проводиться коректура стратегії повернення судна та провадиться друга ітерація перевірки коректності стратегії. Алгоритм

працює за вказаним принципом до отримання безпечної стратегії повернення судна на задану траєкторію. В разі вирішення завдання на сучасних обчислювальних машинах з високою швидкістю своєчасність та оперативність вибору безпечних параметрів стратегії повернення гарантована.

Для тестування коректності одержаних у дисертаційній роботі результатів вибору безпечної стратегії виходу судна на програмну траєкторію руху потрібне створення комп'ютерної програми, яка реалізує можливість такої перевірки.

Актуальність тематики дисертаційного дослідження визначається необхідністю розробки способу розходження суден з урахуванням повернення їх на програмні траєкторії руху, в якому має використовуватись оперативне керування виходом судна на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації з урахуванням координації маневрування суден та без неї.

Поліпшення або вдосконалення методів забезпечення безпечного плавання суден, до яких відноситься і проблематика дисертаційної роботи, що розглядається, заслуговує на уважне вивчення та застосування.

Очікувана наукова новизна дослідження можлива розробки способу розходження суден з урахуванням повернення їх у програмні траєкторії руху. Наукову новизну представляють шукані залежності збільшення відносного курсу від зміни параметрів руху взаємодіючих суден та зміни відносного курсу в часі за заданих параметрів руху судна та цілі.

Можливе скорочення збитків від зниження рівня аварійності через сутички суден може скласти економічну ефективність цього наукового дослідження. Загальна ефективність наукового дослідження також пов'язана з підвищенням безпеки мореплавання, що веде до зменшення ймовірності людських жертв та екологічних катастроф, що виникають під час аварій.

Аналіз літературних джерел, вивчення аспектів проблеми розходження суден та реалізованість запропонованого наукового дослідження повною мірою визначають тему дисертаційної роботи, сформульованої наступним чином: «Розробка методу розходження суден з урахуванням повернення на програмні траєкторії руху».

Як об'єкт дослідження в дисертації обрано процес розходження суден при їх небезпечному зближенні, а предметом дослідження – процес виходу судна на програмну траєкторію руху.

### 1.3. Технологічна карта та структура вирішення завдань дисертаційного дослідження

Коректне вирішення головного та складових завдань дисертаційної роботи та достовірність результатів гарантуються застосуванням системного підходу, що представлено технологічною картою методологічного забезпечення досліджень, що проводяться в дисертації (рис. 1.1).

Недостатній рівень забезпечення безпеки судноводіння та відсутність методу розходження суден з урахуванням виходу на програмні траєкторії руху становлять сучасні запити практики, які визначають актуальність теми дисертації та зумовлюють проведення даного наукового дослідження з обраної тематики.

Метою дисертаційної роботи стала розробка методу розходження суден з урахуванням їхнього повернення на програмні траєкторії руху після безпечного ухилення. Як робочу гіпотезу наукового дослідження було обрано таку тезу: «У випадку розходження суден на малих дистанціях небезпека зіткнення може виникати під час повернення суден на програмні траєкторії після безпечного ухилення, чого можна уникнути вибором безпечних маневрів виходу на програмну траєкторію руху».

Головне завдання дослідження полягає у формуванні алгоритму вибору маневру повернення суден на програмні траєкторії руху після безпечного ухилення.

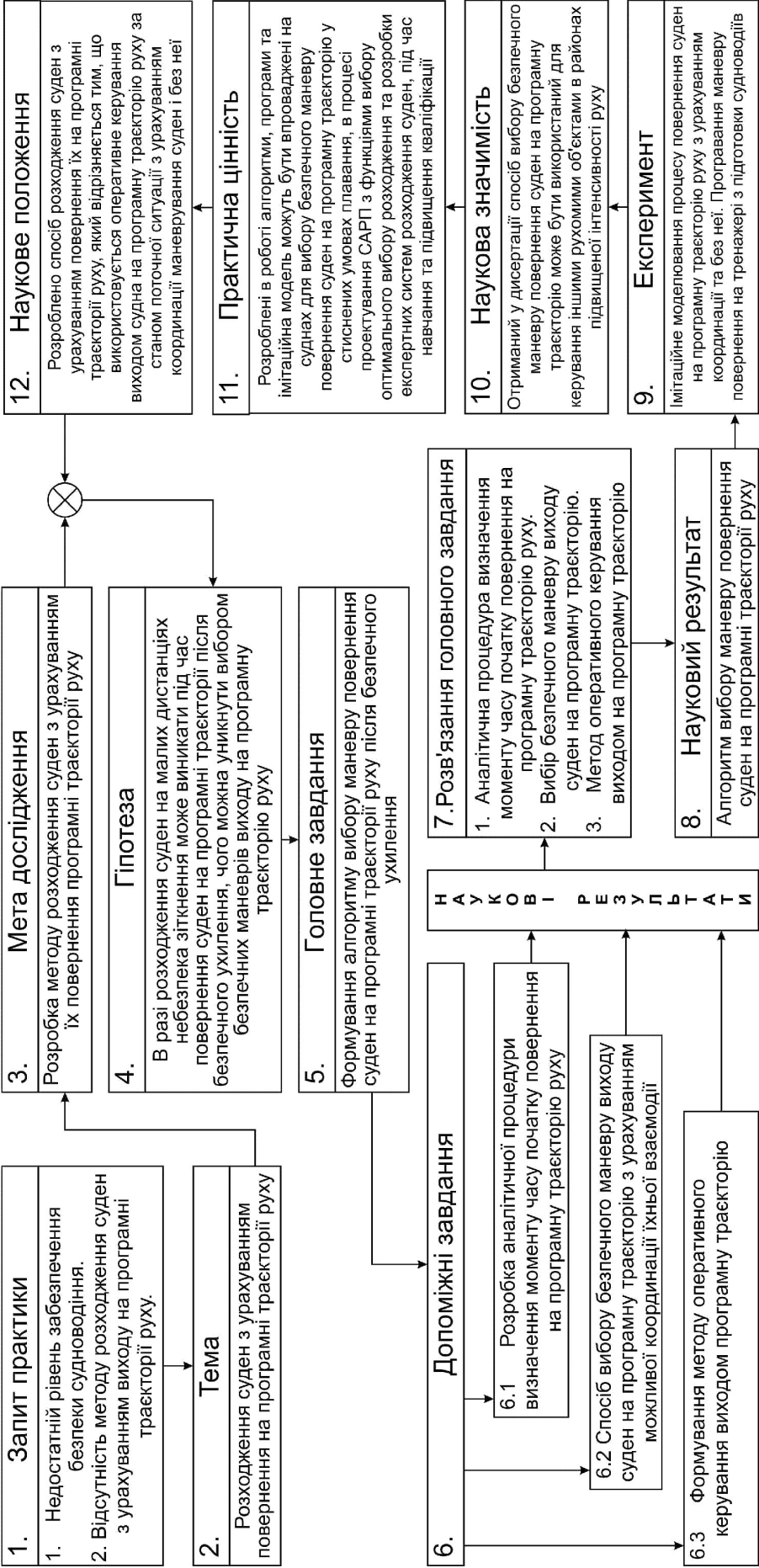


Рисунок 1.1 – Технологічна карта методологічного забезпечення досліджень

Згідно з методами дослідження операцій, вирішення головного завдання дисертації було досягнуто її декомпозицією на три окремі складові завдання.

Проведений аналіз показав доцільність подання головного завдання дисертаційного дослідження такими окремими складовими завданнями:

1. Розробка аналітичної процедури визначення моменту часу етапу завершення ухилення та початку повернення на програмну траєкторію з урахуванням навігаційних перешкод та заважаючих суден.

2. Спосіб вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію за наявності та відсутності координації їхньої взаємодії.

3. Формування методу оперативного керування виходом на програмну траєкторію за станом поточної ситуації.

Вирішення першої часткової складової задачі вимагає формування процедури, що визначає завершення процесу ухилення судна від небезпечної цілі залежно від типу маневру розходження та початкової ситуації, що реалізувалася. Процедура також повинна враховувати можливі навігаційні перешкоди та судна, що заважають, в районі передбачуваного маневрування. Істотним є використання адекватної динамічної моделі судна, що враховує його інерційні характеристики.

Вирішення другого завдання дослідження, тобто повернення судна на програмну траєкторію руху в залежності від того, чи існує координація взаємодії суден на етапі повернення чи ні, вимагає розробки двох відповідних процедур та порівняння їх ефективності, що визначить доцільність координації дій на другому етапі повернення. Тут слід знайти залежності збільшення відносного курсу від зміни параметрів руху судна та цілі, а також залежність зміни відносного курсу від часу за заданих кутових швидкостей повороту суден.

Вирішення третього часткового завдання з розробки методу оперативного керування виходом на програмну траєкторію за станом поточної ситуації вимагає за заданих динамічних моделей руху судна й цілі та їхніх стратегій визначити мінімальне значення дистанції найкоротшого зближення та у разі

потреби коригувати параметри стратегій розбіжності в разі непрогнозованої зміни поточної ситуації.

Вирішення кожного з часткових завдань містить відповідний науковий результат (НР1, НР2 та НР3), які формулюються наступним чином:

науковий результат НР1 першої часткової задачі являє собою аналітичну процедуру визначення моменту часу завершення ухилення судна та початку повернення на програмну траєкторію з урахуванням навігаційних перешкод та суден, що заважають;

науковим результатом другого часткового завдання НР2 є спосіб вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію з урахуванням координат їхньої взаємодії та без неї;

результатом НР3 третього часткового завдання є метод оперативного керування виходом на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації.

Отримані в дисертації теоретичні результати та проведене моделювання підтвердили коректність прийнятої наукової гіпотези про те, що в разі розходження суден на малих дистанціях небезпека зіткнення може виникати під час повернення суден на програмні траєкторії після безпечного ухилення, чого можна уникнути вибором безпечних маневрів виходу на програмну траєкторію.

Практична значимість проведеного дисертаційного дослідження полягає в тому, що отриманий у дисертації спосіб вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію може бути використаний не тільки для розходження суден, а й для керування іншими рухомими об'єктами в районах підвищеної інтенсивності руху.

Результати дисертаційної роботи мають значну практичну цінність, яка полягає в тому, що алгоритми, програми та імітаційна модель можуть бути впроваджені на судах для вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію у стиснених умовах плавання, у проектуванні ЗАРП з функціями вибору оптимального вибору розбіжності та розробки експертних систем розбіжності судів, під час навчання та підвищення кваліфікації судноводіїв.

Отримані в дисертаційному дослідженні наукові результати спільно з результатами проведеного імітаційного моделювання визначають науковий стан дисертаційної роботи, який формулюється таким чином:

Розроблено спосіб розходження суден з урахуванням повернення їх на програмні траєкторії руху, який відрізняється тим, що використовується оперативне керування виходом судна на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації з урахуванням координації маневрування суден і без неї.

#### 1.4 Методика проведення дисертаційного дослідження

Наступна загальна методика використовувалась для проведення дисертаційного дослідження.

За допомогою методів *n*-керованих динамічних систем для ситуації взаємодії двох суден, враховуючи закономірності відносного руху та тип маневру безпечного ухилення, необхідно розробити процедуру визначення моменту часу завершення ухилення та початку повернення на програмну траєкторію руху.

Потім, використовуючи методи теорії ієрархічних багаторівневих систем та теорії координації, необхідно розробити математичну модель вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію руху за наявності координації їхньої взаємодії і без неї. У цьому випадку слід врахувати вихідну позицію суден, їхні параметри руху, можливі значення кутової швидкості повороту. Траєкторія повернення судна на програмну траєкторію повинна враховувати не лише можливу траєкторію цілі, а й наявність навігаційних небезпек у районі маневрування, а також переміщення суден, що заважають. Причому алгоритм вибору безпечного маневру повернення має бути принципово різним для наявності та відсутності координації взаємодії.

У будь-якому випадку для розробки зазначених процедур та алгоритму необхідно дослідити залежність зміни відносного курсу від параметрів руху

судна та цілі, а також зміну відносного курсу в часі за заданих значень кутових швидкостей повороту суден.

Оскільки аналітично прорахований маневр повернення на задану траєкторію через неточності динамічної моделі та можливих змін чинників, що впливають, відрізняється від реалізованого, то необхідно розробити спосіб оперативного керування виходом судна на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації.

Для цього розраховується як початковий маневр за наближеною динамічною моделлю, а потім за його параметрами за допомогою робочої динамічної моделі судна розраховується його траєкторія та визначаються значення відстані між судном і метою для кожного розрахункового моменту часу, і для всієї траєкторії визначається дистанція найкоротшого зближення, яка порівнюється з гранично допустимою дистанцією. Якщо дистанція найкоротшого зближення виявиться більшою за гранично допустиму дистанцію, то параметри маневру повернення судна на програмну траєкторію є прийнятними і приймаються до виконання. В іншому випадку проводиться коректура параметрів маневру виходу, що веде до збільшення дистанції найкоротшого зближення та перевірка повторюється.

Продовжуючи послідовні наближення розрахунку параметрів за вищеписаною процедурою, знаходять допустимий маневр, під час якого дистанція найкоротшого зближення вперше виявиться більшою за гранично допустиму дистанцію і різниця між ними буде мінімальною..

## Висновки з першого розділу дисертації

У першому розділі роботи проведено огляд сучасних напрямів забезпечення безпеки судноводіння під час плавання у стиснених умовах та виконано аналіз шляхів вирішення проблеми запобігання зіткненням суден.

В огляді особлива увага звернена на теоретичні дослідження проблеми безпечного розходження суден та практичні реалізації теоретичних результатів, якими інтенсивно займаються вітчизняні та зарубіжні вчені.

У розділі вказується, що дослідження щодо запобігання зіткненням суден у стиснених водах мають кілька основних аспектів, до яких відноситься опис взаємодії суден у процесі їх розходження з урахуванням структури маневру (стратегії) розходження, вибір для реалізації маневру зміни курсу чи швидкості, врахування наявності навігаційних перешкод та безлічі суден у районі небезпечного зближення, а також урахування інерційних характеристик судна під час вибору оптимальної стратегії розходження.

Здійснено аналіз існуючих концепцій аналітичного опису процесу розходження суден та вибору оптимального маневру, які використовують методи оптимального керування, диференціальних багатокрокових ігор, оптимальних дискретних процесів та динамічних  $n$ -керованих систем.

У главі також розглянуто низку приватних питань, які стосуються вирішення проблеми попередження зіткнень суден.

Здійснено обґрунтування вибору основних напрямів наукового дослідження. Огляд літературних джерел та аналіз підходів щодо вирішення проблеми безпечного розходження суден показали, що питання повернення суден на програмні траєкторії їхнього руху після ухилення на невеликих відстанях не розглянуті та потребують серйозного наукового дослідження, що дозволяє створити алгоритм та комп'ютерну імітаційну програму. Ця тематика і визначила напрям дисертаційного дослідження.

Показано, що проблема забезпечення безпеки судноводіння у стиснених водах потребує подальшого вирішення, причому необхідна розробка методу вибору безпечного маневру повернення на програмну траєкторію руху, чим обумовлений вибір тематики дисертаційного дослідження.

Було здійснено постановку наукового завдання дисертаційного дослідження та сформульовано вимоги до математичної моделі вибору

безпечного маневру повернення на програмну траєкторію руху після безаварійного ухилення судна.

Також у розділі було розроблено технологічну карту дисертаційного дослідження, що відображає його методологічну структуру, чим забезпечено коректне вирішення поставленої проблеми та отримання достовірних результатів.

У технологічній карті містяться мета дисертаційного дослідження, його головне завдання, яке поділено на три незалежні складові завдання. Для коректного рішення запропоновано робочу гіпотезу, яка в результаті рішення отримала підтвердження своєї коректності. Розв'язання кожного зі складових завдань є окремим науковим результатом, який визначає наукову новизну дисертаційної роботи. Визначено практичну значущість та цінність дисертаційної роботи, отримано її основне наукове положення.

Методологічне обґрунтування вирішення завдань наукового дослідження на тему дисертації та її основні етапи є також результатами другого розділу дисертації. Показано, що достовірність одержаних результатів забезпечується коректним використанням сучасних теоретичних та експериментальних методів наукових досліджень, що включають імітаційне моделювання.

Основні результати розділу надруковані у роботах [127].

## РОЗДІЛ 2

### ОСОБЛИВОСТІ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН НА МАЛИХ ПОЧАТКОВИХ ДИСТАНЦІЯХ

#### 2.1. Застосування методів теорії динамічних $n$ -керованих систем для формалізації процесу розходження суден

Попередній аналіз можливих методів формалізації процесу розходження показав, що розробку математичної моделі керованого розходження суден найбільш доцільно проводити методами теорії динамічних  $n$ -керованих систем.

За визначенням під динамічною системою розуміють будь-який об'єкт або процес, для якого однозначно визначено поняття стану, як сукупності деяких величин і заданий закон, який описує зміну початкового стану з часом [130, 131], і може бути використаний для прогнозу майбутнього стану динамічної системи.

Покажемо, що процес розходження суден адекватно описується у термінах динамічної  $n$ -керованої системи. Припустимо, у деякій області контролю  $S_c$  знаходиться  $n$  суден. Вибір області  $S_c$  тут докладно не обговорюється, хоча за керування рухом суден ззовні (СКРС) область є локально пов'язаною з СКРС, та її розміри визначаються зоною контролю системи керування. У разі керування ситуацією судном, область  $S_c$  пов'язана з судном та охоплює навколишній район. Величина  $n$  цілочисленна і може набувати різних значень.

Локальна близькість суден, що належать до області контролю  $S_c$ , дозволяє розглядати їхню сукупність, як деяку динамічну систему  $\Sigma$ , яка утворилася за принципом їхньої приналежності до області  $S_c$ . Враховуючи, що центральним питанням, що диктує розробку математичної моделі, є забезпечення безпечного руху суден у галузі, що розглядається, динамічна

система  $\Sigma$  повинна описуватись з позицій їх безпечного відносного переміщення.

Відповідно до роботи [130], визначим динамічну систему, що описує сукупність  $n$  суден, враховуючи, що така система є керованою всіма  $n$  суднами. Даний опис має відношення тільки до динамічної системи без урахування впливу збурень зовнішнього середовища, що формалізується у вигляді додаткових параметрів у математичній моделі.

Насамперед необхідно задати відрізок часу  $[t_0, T]$ , причому  $t_0$  в окремому випадку може набувати нульового значення.

Фазовими координатами системи, що описують її стан, є координати  $\xi_i(t)$  і  $\eta_i(t)$  кожного з суден та їхні параметри руху  $V_i(t)$  і  $K_i(t)$  у двовимірній прямокутній системі координат, пов'язаній з областю контролю  $S_c$  та орієнтованої у напрямку N-S.

Задаючи множину станів  $X$  системи  $\Sigma$ , враховуємо, що окремий стан  $x = x(t)$ , як елемент множини  $X$ , є  $4n$ -мірним вектором, а множина станів  $X$  –  $4n$ -мірною областю, причому  $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ , де  $X_i$  – множина станів  $i$ -го судна. Множина станів  $X_i = (\xi_i, \eta_i, V_i, K_i)$  обмежується граничними значеннями фазових координат:

$$\xi_i \in [\xi_{\min i}, \xi_{\max i}]; \eta_i \in [\eta_{\min i}, \eta_{\max i}]; V_i \in [V_{\min i}, V_{\max i}]; K_i \in [0, 2\pi].$$

Як  $n$ -керована, динамічна система  $\Sigma$  характеризується ще двома додатковими атрибутами.

По-перше, це множина миттєвих значень вхідних керуючих впливів  $W$ , до яких в даному випадку відносяться кут перекладки пера керма і обороти двигуна кожного  $i$ -го судна.

По-друге, множина стратегій поведінки  $\Omega$ , характеризують правила вибору значень вхідних керуючих впливів у часі залежно від обставин. У динамічній системі, що розглядається, вхідний вплив «розділений» між

учасниками спільного керування ( $i=1...n$ ). Причому кожному учаснику поставлено у відповідність дві непорожні множини  $U_k$  і  $D_k$ , які будемо називати відповідно множиною миттєвих значень керувань  $i$ -го учасника та множиною стратегій того ж учасника.

Перехідна функція стану  $\chi:[t_0, T] \times [t_0, T] \times X \times \Omega \rightarrow X$ , (закон зміни стану системи) завершує опис керованої динамічної системи стандартного типу. У нашому випадку зміна динамічної системи  $\Sigma$  описується диференціальними рівняннями.

Як зазначається в [132] будь-яка динамічна система виду:

$$\Sigma = ([t_0, T], X, \Omega_n, \chi),$$

де  $\Omega_n = D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n$ , називається загальною динамічною системою з  $n$  керуваннями і безперервним часом. Її будемо позначати:

$$\Sigma = ([t_0, T], X, D_1, D_2, \dots, D_n, \chi). \quad (2.1)$$

Для динамічної системи  $\Sigma$ , яка описує сукупність  $n$  суден, додатково до опису (2.1) необхідно врахувати ще два істотні чинники [131]:

6. доцільний характер поведінки кожного з суден, що полягає, з погляду судноводіння, у реалізації програмної траєкторії руху;

7. наявність залежності стратегій  $D_i$  суден одна від одної та від поточної позиції. Якщо залежність існує, необхідно отримати її формальний вираз.

Тому динамічну систему, утворену  $n$  суднами, яку позначимо  $\Sigma_{ns}$ , можна записати у наступному вигляді:

$$\Sigma_{ns} = \{[t_0, T], X, D_1, D_2, \dots, D_n, \chi, G(D_i, X), M(Tr_i)\}.$$

У цьому виразі  $G(D_i, X)$  – залежність стратегій одна від одної та від поточної позиції, а  $M(Tr_i)$  – сукупність програмних траєкторій руху суден.

У цьому випадку перехідна функція стану динамічної системи має вигляд  $\chi: [t_0, T] \times [t_0, T] \times X \times D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n \rightarrow X$ , з урахуванням того, що задані  $G(D_i, X)$  и  $M(Tr_i)$ .

Як раніше зазначалося, під час переміщення суден програмними траєкторіями у спільному районі плавання, визначальною обставиною є забезпечення їхнього безпечного руху один відносно іншого, що потребує контролю за величиною відстані між суднами. Тому виникає потреба розгляду всіх пар суден динамічної системи.  $\Sigma_{ns}$  з описом їх бінарних характеристик, що відображають відносне становище. У зв'язку з цим під позицією динамічної системи  $\Sigma_{ns}$  будемо розуміти відносне становище суден, для чого введемо на розгляд позиційну матрицю  $P_n$  [133].

Для аналітичного запису матриці позицій  $P_n$  необхідно розглянути зміну стану  $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$  системи  $\Sigma_{ns}$ , яке описується диференціальним рівнянням:

$$\dot{x}(t) = [\dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dots, \dot{x}_n(t)],$$

причому:

$$\dot{x}_i = \begin{bmatrix} \dot{\xi}_i \\ \dot{\eta}_i \\ V_i \\ K_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i \sin K_i \\ V_i \cos K_i \\ f_v(V_{3i}, \beta_i) \\ f_k(\beta_i) \end{bmatrix},$$

де  $\beta_i$  и  $V_{3i}$  – відповідно кут перекладки пера керма та задана швидкість  $i$ -го судна системи.

Оскільки інтерес представляє взаємне положення суден та його зміна у

часі, то елементарним об'єктом розгляду є пара суден  $c_{ij}$  ( $i, j = 1 \dots n, ij$ ), стан якої описується різницевиими координатами:

$$\xi_{ij} = \xi_i - \xi_j; \quad \eta_{ij} = \eta_i - \eta_j,$$

а його зміна – диференціальним рівнянням:

$$\dot{x}_{ij} = \begin{pmatrix} \dot{\xi}_{ij} \\ \dot{\eta}_{ij} \\ V_i \\ K_i \\ V_j \\ K_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\xi}_i - \dot{\xi}_j \\ \dot{\eta}_i - \dot{\eta}_j \\ f_v(V_{3i}, \beta_i) \\ f_k(\beta_i) \\ f_v(V_{3j}, \beta_j) \\ f_k(\beta_j) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_i \sin K_i - V_j \sin K_j \\ V_i \cos K_i - V_j \cos K_j \\ f_v(V_{3i}, \beta_i) \\ f_k(\beta_i) \\ f_v(V_{3j}, \beta_j) \\ f_k(\beta_j) \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Характеристикою пари суден  $c_{ij}$ , як мінімальної  $n$ -керованої динамічної системи є відстань між суднами  $l_{ij}$  і пеленг  $\alpha_{ij}$  з  $i$ -го на  $j$ -е судно, які однозначно визначаються різницевиими координатами  $\xi_{ij}$  і  $\eta_{ij}$ .

Отже, матриця  $P_n$  є квадратною матрицею розмірності  $n$ , елемент якої  $p_{ij}$  характеризує пару суден  $c_{ij}$ :

$$p_{ij} = \{l_{ij}, \alpha_{ij}, K_{otij}, V_{otij}\},$$

причому  $K_{otij}$  і  $V_{otij}$  – курс і швидкість відносного руху, що характеризують простір відносного руху. Цей простір реалізує рух одного судна відносно нерухомого другого, позиція першого судна задана в системі координат, пов'язаної з другим судном полярними координатами  $l_{ij}$  і  $\alpha_{ij}$ , а його рух характеризується вектором  $(V_{otij}, K_{otij})$ . Простір істинного руху характеризує

рухи обох суден відносно загальної нерухомої системи координат. Причому відомі відображення з одного простору до другого, що характеризують залежності параметрів відносного руху від істинного, і навпаки. Слід зазначити, що інваріантними для обох просторів є дистанція  $l_{ij}$  і пеленг  $\alpha_{ij}$ .

Позиційна матриця  $P_n$ , розгорнута в часі є складним керованим процесом  $P_t$ , який містить підпроцеси  $P_{ij}$  для кожної пари  $c_{ij}$  суден і  $P_{ii}$  для  $i$ -го судна, включаючи всі інші судна. Процес  $P_t$  зміни позицій у часі з урахуванням диференціального рівняння  $\dot{P}_t = \{\dot{p}_{ij}\}$  є траєкторією в просторі (множині) позицій.

Оскільки кожне судно контролює своє положення, як і положення навколишніх рухомих об'єктів за допомогою суднової системи навігаційної інформації, то динамічної системи  $\Sigma_{ns}$  властивий стохастичний аспект, який обумовлений як наявністю похибок виміру навігаційних параметрів, так і елементів невизначеності поведінки суден.

Тому множина позицій  $M(P_n)$  складається з декількох підмножин  $M(P_{nk})$ , кожне з яких характеризується певним ступенем небезпеки виникнення аварії зіткнення. Подальший опис динамічної системи  $\Sigma_{ns}$  пов'язано з підмножинами  $M(P_{nk})$  (що характеризуються від нульової до одиничної ймовірностями зіткнення) та поняттям ситуаційного збурення, для характеристики яких введена в розгляд мінімальна динамічна керована система  $\Sigma_{2s}$ .

До її складу входить пара суден  $c_{12}$ , якій відповідає елемент позиційної матриці  $p_{12}$ . Виходячи з наявності стохастичного аспекту і аспекту невизначеності, а також через інерційність суден, що рухаються, з кожним з них пов'язується двовимірна область, звана областю неприпустимих позицій. З назви області випливає, що у ній небажане перебування будь-яких сторонніх об'єктів. Область неприпустимих позицій  $S_{nd}$  повинна бути сформована таким

чином, щоб її межа відповідала нульовій ймовірності зіткнення. А кожній точці всередині області  $S_{nd}$  відповідає деяка відмінна від нуля ймовірність виникнення зіткнення.

Отже, деякі порогові значення ймовірності зіткнення всередині області  $S_{nd}$  розбивають множину позицій  $M(P_n)$  на підмножини  $M(P_{nk})$ . Природу ситуаційного збурення укладено у прогнозованому попаданні суден у область неприпустимих позицій (першого судна до області  $S_{nd2}$  другого судна та навпаки – другого судна в область  $S_{nd1}$  першого). Власне, ситуаційні збурення  $\omega_{12}$  і  $\omega_{21}$  не завжди є симетричними для обох суден, оскільки області  $S_{nd1}$  і  $S_{nd2}$  не еквівалентні одна одній. Тому можливі ситуації, коли за наявності ситуаційного збурення для одного із суден ( $\omega_{21}$ ), по відношенню до іншого ( $\omega_{12}$ ) воно відсутнє.

Ситуаційне збурення виявляє майбутню небезпечну позицію заздалегідь, виходячи з прогнозу зміни відносної позиції  $p_{12}$ . Тому воно має умовний характер, оскільки на його істинність впливають можливі дії суден і спосіб прогнозу.

Поява ситуаційного збурення  $\omega_{12}$  ( $\omega_{21}$ ) передбачає появу взаємодії між суднами і виникає завдання компенсації ситуаційного збурення вибором відповідної стратегії розходження.

Однак, через несиметричність ситуаційного збурення (з істинності  $\omega_{12}$  не витікає істинність  $\omega_{21}$  і навпаки), взаємодія може бути повною та частковою. В разі повної взаємодії з'являється повна система  $\Sigma_{2s}$  ( $\omega_{12} \neq 0$  і  $\omega_{21} \neq 0$ ). А у разі, коли одне із ситуаційних збурень відсутнє, то взаємодія часткова.

З позицій характеристики взаємодії суден доцільно запровадити матрицю ситуаційного збурення  $D_{bn}$ , яка за своєю структурою аналогічна позиційній матриці  $P_n$ . Елементом матриці  $D_{bn}$  є характеристика ситуаційного збурення  $d_{ij}$ , яка дорівнює 0 за відсутності ситуаційного збурення між парою суден  $c_{ij}$ . В іншому випадку  $d_{ij} = \{\omega_{ij}, l_{\min ij}, t_{\min ij}\}$ .

Якщо позначити  $n_b$  число взаємодіючих суден, то за  $n_b = 0$ , коли в динамічній системі не виникає ситуаційне збурення, взаємодія суден відсутня, та елементи динамічної системи є непов'язаними. Елементи виконують цільові функції, реалізуючи програмні траєкторії руху. Динамічна система знаходиться в початковому системному стані, який характеризується незалежними диференціальними рівняннями, що описують керований рух суден відповідно до заданої програми руху, та компенсацією високочастотних збурень (за параметрами руху та траєкторії руху).

У цьому випадку динамічна система  $\Sigma_{ns}$  характеризується нульовою матрицею ситуаційного збурення  $D_{bn}$ , яка містить лише нульові елементи ( $d_{ij} = 0$ ). Для системи  $\Sigma_{2s}$  принципово важливою є відсутність взаємодії між суднами. Структура системи  $\Sigma_{ns}$  характеризується відсутністю зв'язків між елементами, чим визначається її перша системна властивість.

Якщо взаємодіє лише одна пара суден, причому взаємодія часткова, то  $n_b = 1$ , тобто формально у стані взаємодії знаходиться всього одне судно, то ситуаційне збурення  $\omega_{ij}$  переводить динамічну систему  $\Sigma_{ns}$  у новий системний стан, оскільки з'являється нова (друга) системна властивість, чого не було у випадку розгляду окремого судна. У парі суден з'являється нова системна властивість, що характеризується відносною позицією та взаємодією, з'являються параметри дистанції між суднами та пеленга з судна на судно, чого не існувало для окремого судна. Слід звернути увагу, що поява зазначеної системної властивості обумовлено зміною структури системи  $\Sigma_{ns}$  – виникненням зв'язків між елементами.

В цьому випадку, за  $n_b = 1$  у диференціальних рівняннях руху динамічної системи виходить односторонній зв'язок з відповідною парою диференціальних рівнянь, та одне із суден, характеристика  $d_{ij}$  ситуаційного збурення якого відмінна від нуля, має змінити стратегію доцільного руху на стратегію компенсації ситуаційного збурення.

Якщо ж  $n_b = 2$  за умови, що взаємодія повна (а не дві часткові взаємодії), тобто ситуаційне збурення симетричне, виникає бінарна взаємодія, в якій в залежності від інтенсивності ситуаційного збурення (як функції значень  $\min l_{ij}$  і  $\min t_{ij}$ ) вибирається стратегія його компенсації, та розраховуються параметри маневру розходження. За цих умов диференціальні рівняння, що описують рух пари взаємодіючих суден, пов'язані між собою і, провадячи спільне керування позицією, судна спільно, за деяким правилом, компенсують ситуаційне збурення. Матриця ситуаційного збурення  $D_{bn}$  у цьому випадку містить два симетричні елементи  $d_{ij}$  і  $d_{ji}$  відмінні від нуля, які в загальному випадку можуть мати різну інтенсивність.

Зрештою, за  $n_b = 3$ , та участі хоча б одного судна не менше, ніж у двох взаємодіях (повних або часткових), динамічна система  $\Sigma_{ns}$  переходить у третій системний стан. Система набуває нової системної властивості в аспекті керованості, тому що для окремого судна взаємодії перестають бути бінарними та збурення, як і стратегія розходження, ускладнюються, з'являються нові об'єкти – координаційні каркаси – послідовно-паралельні структури навколишніх суден, які необхідно впорядкувати за допомогою складної стратегії компенсації ситуаційного збурення. У структурі динамічної системи  $\Sigma_{ns}$  з'являються зв'язки, що поєднують кілька елементів один з одним.

Матриця ситуаційного збурення  $D_{bn}$  стає джерелом формування ситуаційних каркасів, котрі пов'язують для конкретного судна структуру небезпечних і заважаючих суден. У цьому випадку із незалежної вихідної системи диференціальних рівнянь вичленяються групи залежних рівнянь взаємодіючих суден, для яких потрібно знайти узгоджені стратегії (взаємозалежні), що забезпечують компенсацію ситуаційного збурення.

Ситуаційне збурення перекладає динамічну систему  $\Sigma_{ns}$  з першого незбуреного системного стану у вищі збурені. Загальна стратегія компенсації ситуаційного збурення передбачає переведення динамічної системи  $\Sigma_{ns}$  у

початковий незбурений стан шляхом знищення у структурі системи зв'язків взаємодії між елементами (суднами).

У невизначених умовах поведінки партнера, коли навіть ймовірнісний розподіл вибору партнером стратегії розходження обґрунтувати важко, судну слід використовувати принцип застосування гнучких стратегій розходження (компенсації ситуаційних збурень). Сутність цього принципу полягає у мінімакських підходах судна до використання партнером можливих альтернативних стратегій розходження.

Гнучкі стратегії у загальному випадку є функціями часу, враховують багатоваріантність поведінки судна-партнера і можливість погіршення ситуації розходження з часом, тобто їм притаманні такі особливості:

8. із множини можливих стратегій розходження судна-партнера вибирається найбільш несприятлива для того, щоб мінімізувати загрозу зіткнення;

9. контролюється поведінка судна-партнера і за зміни параметрів його маневру розходження у разі потреби може бути змінено маневр чи навіть стратегія розходження оперуючого судна;

10. за необхідності збереження параметрів руху заздалегідь прораховується можливий варіант стратегії розходження оперуючого судна, якщо ситуація погіршиться переходом у наступну область взаємних обов'язків.

Оскільки вихід судна на задану траєкторію руху на завершення процесу розходження є взаємодією його з однією ціллю (останньою за наявності декількох), необхідно розглянути клас мінімальних динамічних систем, що складаються з двох суден, які можуть перебувати в різних типах взаємодії.

Динамічні системи  $\Sigma_{2s}$ , що розглядаються, містять у своєму складі лише два судна, можуть перебувати лише у двох системних станах: першому за відсутності взаємодії між ними та другому – за появи взаємодії.

Загалом мінімальна динамічна система  $\Sigma_{2s}$  має такий формальний вираз:

$$\Sigma_{2s} = \{[t_0, T], X, D_1, D_2, \chi, G(D_1, D_2, X), M(Tr_1, Tr_2)\},$$

причому її стан описується різницевиими координатами:

$$\xi_{12} = \xi_1 - \xi_2; \quad \eta_{12} = \eta_1 - \eta_2,$$

а зміна стану – диференціальним рівнянням:

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \dot{\xi}_{12} \\ \dot{\eta}_{12} \\ V_1 \\ K_1 \\ V_2 \\ K_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2 \\ \dot{\eta}_1 - \dot{\eta}_2 \\ f_v(V_{31}, \beta_1) \\ f_k(\beta_1) \\ f_v(V_{32}, \beta_2) \\ f_k(\beta_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2 \\ V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2 \\ f_v(V_{31}, \beta_1) \\ f_k(\beta_1) \\ f_v(V_{32}, \beta_2) \\ f_k(\beta_2) \end{pmatrix}.$$

Зазначимо, що для динамічної системи  $\Sigma_{2s}$  важливою є початкова інтенсивність  $\tilde{\omega}_0$  ситуаційного збурення, оскільки вона найменш небезпечна з точки зору розвитку ситуації можливого зіткнення, а відсутність третіх учасників дозволяє починати компенсацію ситуаційного збурення з початкової позиції. Максимальна інтенсивність  $\tilde{\omega}$  ситуаційного збурення для динамічної системи  $\Sigma_{2s}$  менш важлива.

Розглянемо підмножину часткових  $M(Bz_p)$  взаємодій, які можуть реалізуватися у динамічній системі  $\Sigma_{2s}$ . Для часткових взаємодій суттєвими є три різновиди  $Bz_{pk}$ , що відрізняються початковою інтенсивністю  $\tilde{\omega}_0$  ситуаційного збурення, тобто:

$$Bz_{p1} = \{\tilde{\omega}_0 = 0, \min t, \hat{t}_1\}, \quad Bz_{p2} = \{\tilde{\omega}_0 = 1, \min t, \hat{t}_2\}, \quad Bz_{p3} = \{\tilde{\omega}_0 = 2, \min t, \hat{t}_3\}.$$

Принципово важливим при часткових взаємодіях є і те, що компенсація збурення здійснюється лише одним судном, оскільки друге судно безперешкодно реалізує свою програмну траєкторію руху. І тут реалізується

принцип раціонального керування, тобто один агент керує ситуацією, прагнучи досягти бажаного результату. Програмна траєкторія другого судна враховується як нейтральні вхідні змінні. Таким чином, в разі часткової взаємодії динамічна система  $\Sigma_{2s}$  набуває вигляду:

$$\Sigma_{2s} = \{[t_0, T], X, D_1, Tr_2, \chi, M(Tr_1, Tr_2)\}.$$

У цьому випадку система диференціальних рівнянь набуває вигляду:

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} V_1 \sin K_1(D_1) - V_2 \sin K_2(Tr_2) \\ V_1 \cos K_1(D_1) - V_2 \cos K_2(Tr_2) \\ f_v(V_{31}, \beta_1) \\ f_k(\beta_1) \\ f_v(V_{32}, \beta_2) \\ f_k(\beta_2) \end{pmatrix}.$$

Чотири останні рядки матриці характеризують перехідні процеси в разі зміні курсу та швидкості обох суден, тому поки їх можна виключити з матриці, надалі розглянувши їх урахування під час розрахунку параметрів маневру розходження. Тому:

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} V_1 \sin K_1(D_1) - V_2 \sin K_2(Tr_2) \\ V_1 \cos K_1(D_1) - V_2 \cos K_2(Tr_2) \end{pmatrix},$$

де складові швидкості другого судна  $V_2 \sin K_2$  і  $V_2 \cos K_2$  визначаються програмною траєкторією руху  $Tr_2$ , а складові швидкості першого судна  $V_1 \sin K_1$  і  $V_1 \cos K_1$  залежать від стратегії розходження  $D_1$ . Тому стратегія розходження  $D_1$  має забезпечити безпечне переведення прогнозованої найбільш небезпечної позиції в максимально безпечну, тобто максимальну інтенсивність  $\tilde{\omega}^{(n)}$

ситуаційного збурення (за умови дотримання суднами програмних траєкторій до моменту найкоротшого зближення) змінити до мінімального початкового значення  $\tilde{\omega}_{\min}$  (після маневру розходження). Для мінімальної динамічної системи  $\Sigma_{2s}$  за відсутності зовнішніх обмежень (навігаційні перешкоди, вітер, течія тощо) як для часткових, так і для повних взаємодій, мінімальне значення  $\tilde{\omega}_{\min}$  інтенсивності дорівнює 0.

Стратегія розходження  $D_1$ , як спосіб компенсації ситуаційного збурення, переводить систему  $\Sigma_{2s}$  з потенційно збуреної (за прогнозом) позиції у потенційно (знову за прогнозом) незбурену.

З огляду на вимогу до стратегії розходження  $D_1$ , розглянемо ситуації із різними значеннями початкової інтенсивності збурення  $\tilde{\omega}_0$ , як в разі  $\rho < 1$ , так і за  $\rho > 1$ .

У разі коли  $\tilde{\omega}_0 = 0$  судно може розійтися з ціллю на мінімальній дистанції  $\min l(D_1) \geq l_{d1}$ , причому достатня одна ділянка ухилення. Отже, стратегія розходження за  $\rho < 1$  і  $\tilde{\omega}_0 = 0$  являє собою єдину ділянку ухилення судна з програмної траєкторії, що забезпечує співвідношення  $\min l(D_1) \geq l_{d1}$ . Причому вибір стратегії залежить від максимальної інтенсивності ситуаційного збурення  $\tilde{\omega}$ . У цьому випадку стратегія розходження  $D_1$  характеризується часом  $t_y$  початку ухилення та курсом  $K_y$  ухилення, тобто:

$$D_1(\rho < 1, \tilde{\omega}_0 = 0) = D_1(t_y, K_y).$$

Якщо  $\tilde{\omega}_0 = 1$ , ситуація мінімального зближення не може бути виведена з небезпечної підмножини  $P_{n1}$ , тобто  $l_{d1} > \min l(D_1) \geq l_{d2}$ . У цьому випадку, враховуючи, що друге судно не бере участі у компенсації ситуаційного збурення, стратегія  $D_1$  має забезпечити максимальну безпеку розходження суден, максимізуючи дистанцію найкоротшого зближення. Оскільки

$\max[\min l(D_1)]$  досягається за екстремального відносного курсу  $K_{otextr}$ , то він має використовуватися стратегією  $D_1$ , причому ухилення починається у нульовий момент часу.

У цьому випадку стратегія розходження  $D_1$  реалізується однією ділянкою ухилення та характеризується тільки курсом ухилення  $K_{extr}$  (коли досягається  $K_{otextr}$ ), враховуючи, що ухилення починається у нульовий момент часу, тобто:

$$D_1(\rho < 1, \tilde{\omega}_0 = 1) = D_1(K_y = K_{extr}).$$

В разі  $\tilde{\omega}_0 = 2$  (хоча часткова взаємодія за такого ситуаційного збурення малоїмовірна) судно неминуче потрапляє у підмножину небезпечних позицій  $P_{n2}$  і виникає ситуація надмірного зближення, в якій судно, що взаємодіє, мінімізує відносну швидкість зближення суден, збільшуючи інтервал часу до позиції мінімального зближення. Для цього судно лягає на курс, що дорівнює зворотному пеленгу на друге судно, залучаючи друге судно у взаємодію, щоб спільними зусиллями компенсувати ситуаційне збурення.

Стратегія судна  $D_1$  у цьому випадку полягає в русі змінним курсом, що дорівнює протилежному поточному пеленгу на друге судно.  $\alpha(t)$ , утримуючи позицію у підмножині небезпечних позицій  $P_{n2}$ . Зазначимо, що за надмірного зближення для виходу в безпечну підмножину позицій  $P_{n0}$  доцільно спочатку використовувати рух судна курсом  $K_y = \alpha(t) + \pi$ , а потім після досягнення позиції підмножини  $P_{n1}$  слід застосувати стратегію  $D_1(\rho < 1, \tilde{\omega}_0 = 1)$  до завершення ухилення та виходу позиції у безпечну підмножину  $P_{n0}$ . Отже, для цього випадку характеристика стратегії має такий вигляд:

$$D_1(\rho < 1, \tilde{\omega}_0 = 2) = D_1[K_y = \alpha(t) + \pi, t_y, K_y = K_{extr}].$$

Зауважимо, що для перших двох розглянутих стратегій після часу  $\min t$  поточна позиція стає все менш небезпечною, поки не досягне підмножини  $P_{n0}$ . У цьому реалізується відповідна стратегія розходження без зміни параметрів.

Отримані три стратегії характеризують різні способи поведінки судна за різних приватних взаємодій.

Розглянемо компенсацію ситуаційних збурень за часткової взаємодії судном у ситуації  $\rho > 1$  для різних значень початкової інтенсивності збурення  $\tilde{\omega}_0$ .

У ситуації, коли  $\tilde{\omega}_0 = 0$  (судно не знаходиться у колі радіусу  $l_{d1}$ ) воно може розійтися з ціллю на мінімальній дистанції  $\min l(D_1) \geq l_{d1}$ , використовуючи одну ділянку ухилення. В даному випадку ( $\rho > 1$  і  $\tilde{\omega}_0 = 0$ ) стратегія розходження  $D_1$  аналогічна до ситуації  $\rho < 1$  і  $\tilde{\omega}_0 = 0$ . Вона забезпечує співвідношення  $\min l(D_1) \geq l_{d1}$ .

У цьому випадку (як і за  $\rho < 1$ ) стратегія розходження  $D_1$  характеризується часом початку ухилення та курсом ухилення, тобто:

$$D_1(\rho > 1, \tilde{\omega}_0 = 0) = D_1(t_y, K_y).$$

Чергова ситуація  $\tilde{\omega}_0 = 1$  характеризується тим, що початкова позиція судна перебуває у підмножині позицій  $P_{n1}$ , тобто має місце нерівність  $l_{d1} > l_n \geq l_{d2}$ . Оскільки судно має можливість відносного переміщення у будь-якому напрямку, йому необхідно збільшувати поточну дистанцію між суднами, маючи відносне переміщення перпендикулярно до початкового пеленгу, тобто відносним курсом  $K_{oty} = \alpha_n + \frac{\pi}{2}$ .

Тому в цій ситуації стратегія розбіжності  $D_1$  полягає у переміщенні судна відносним курсом  $K_{oty} = \alpha_n + \frac{\pi}{2}$  у початковий момент часу, поки не буде

досягнуто підмножини безпечних позицій  $P_{n0}$ . Якщо визначити курс ухилення судна  $K_{y\pi/2}$ , коли досягається  $K_{oty} = \alpha_n + \frac{\pi}{2}$ , то стратегія  $D_1$  записується:

$$D_1(\rho > 1, \tilde{\omega}_0 = 1) = D_1(K_{y\pi/2}) = D_1(K_{y\pi/2}).$$

Розглянемо випадок, коли  $\tilde{\omega}_0 = 2$ , тобто початкова позиція судна належить підмножині небезпечних позицій  $P_{n2}$ . У цьому випадку початкова дистанція між суднами обмежена гранично допустимими дистанціями  $l_{d2}$  і  $l_{d3}$ , тобто  $l_{d2} > l_n \geq l_{d3}$ .

Стратегія розходження у тому, щоб судно спочатку у найкоротший інтервал часу залишило підмножину небезпечних позицій  $P_{n2}$ , для чого у початковий час воно має максимально збільшити швидкість зміни дистанції між суднами. Це досягається тим, що судно лягає на курс зворотний пеленгу на друге судно, тобто  $K_y = \alpha_n + \pi$ , і переміщається, доки не досягне межі між підмножинами позицій  $P_{n1}$  і  $P_{n2}$ . З цієї миті судно, як і в попередній стратегії, реалізує відносне переміщення з курсом  $K_{oty} = \alpha_n + \frac{\pi}{2}$  до виходу в безпечну підмножину позицій  $P_{n0}$ . Отже, для цього випадку стратегія  $D_1$  має вигляд:

$$D_1(\rho > 1, \tilde{\omega}_0 = 2) = D_1(K_y = \alpha + \pi, t_y, K_{y\pi/2}).$$

Таким чином, залежно від часткової взаємодії, що реалізувалася  $Bz_{p1} \div Bz_{p3}$  та співвідношення швидкостей суден  $\rho$  можуть формуватися різні типи стратегій, перелік яких представлений у табл. 2.1.

Перелік стратегій розходження часткових взаємодій

Взаємодії	Стратегії розходження $D_1$
$Bz_{p1}, \tilde{\omega}_0 = 0, \rho > 1, \rho < 1$	$D_1(t_y, K_y)$
$Bz_{p2}, \tilde{\omega}_0 = 1, \rho < 1$	$D_1(K_y = K_{extr})$
$Bz_{p3}, \tilde{\omega}_0 = 2, \rho < 1$	$D_1[K_y = \alpha(t) + \pi, t_y, K_y = K_{extr}]$
$Bz_{p2}, \tilde{\omega}_0 = 1, \rho > 1$	$D_1(K_{y\pi/2})$
$Bz_{p3}, \tilde{\omega}_0 = 2, \rho > 1$	$D_1(K_y = \alpha + \pi, t_y, K_{y\pi/2})$

## 2.2. Врахування навігаційних небезпек і суден, що заважають, на етапі ухилення під час розходження судна і цілі на малих відстанях

Звертаючись до роботи [128], зауважимо, що постановка завдання екстреного розходження проводилася за допущення відсутності навігаційних небезпек у районі передбачуваного маневрування суден. Результатом статті стала отримана мінімаксна стратегія поведінки судна, яка полягає в його повороті до напрямку зворотного пеленгу на ціль за найкоротшою кутовою відстанню із максимальною кутовою швидкістю. Досягнувши курсу, що дорівнює величиною зворотному пеленгу на ціль, тобто  $K(t) = \alpha(t)$  судно надалі зберігає наведену рівність.

Однак за наявності навігаційних небезпек може виявитися, що обраний мінімаксний курс судна, отриманий згідно з рекомендаціями роботи [128], веде до посадки на міліну, а за наявності судна, що заважає, – до небезпечного зближення з ним. У цьому підрозділі розглянемо питання вибору курсу судна в разі екстреного розходження з урахуванням наявних навігаційних небезпек і судна, що заважає. Як зазначається у роботі [24], основними типами навігаційних небезпек є точкова та лінійна розподілена. Тому спочатку



ухилення судна  $K_{st}(t)$  і  $K_{pr}(t)$  визначаються такими виразами:

$$K_{st}(t) = \alpha_o(t) + \arcsin \frac{R}{D_o(t)},$$

$$K_{pr}(t) = \alpha_o(t) - \arcsin \frac{R}{D_o(t)}.$$

Оскільки з часом величина  $D_o(t)$  зменшується, то граничний курс  $K_{pr}(t)$  зменшується, а  $K_{st}(t)$  – збільшується, причому обидва курси все більше відхиляються від оптимального  $K_{op}(t) = \alpha(t)$ . Вказана обставина визначає вибір курсу ухилення  $K_y$  від точкової небезпеки, враховуючи, що  $K_y$  буде тим ефективніше, що менше відхилення його від  $\alpha(t)$ . При цьому можливі два наступні варіанти. По-перше, у початковий момент часу  $t_n$ , коли граничні курси  $K_{pr}(t)$  і  $K_{st}(t)$  найменше відрізняються від  $\alpha(t)$ , як курс ухилення  $K_y$  слід вибрати граничний курс ( $K_{pr}(t)$  або  $K_{st}(t)$ ), який за значенням ближче до величини  $\alpha(t)$ , що аналітично виражається так:

$$K_y = K_{pr}(t_n), \quad \text{за} \quad |K_{pr}(t_n) - \alpha(t_n)| < |K_{st}(t_n) - \alpha(t_n)|,$$

$$K_y = K_{st}(t_n), \quad \text{за} \quad |K_{pr}(t_n) - \alpha(t_n)| \geq |K_{st}(t_n) - \alpha(t_n)|.$$

Другий варіант полягає в тому, що судно слідує оптимальним курсом.  $K_{op}(t) = \alpha(t)$  до моменту  $t_1$  безпосередньої близькості до точкової навігаційної небезпеки, потім значно (на  $60-70^\circ$ ) змінює курс, запобігаючи потраплянню на небезпеку. Таким курсом судно слідує до моменту часу  $t_2$ , після якого повертається на оптимальний курс  $K_{op}(t) = \alpha(t)$ . Перевага вибору одного з двох варіантів визначається початковою позицією суден одне відносно одного та

небезпеки, параметрами руху суден, а для отримання аналітичних залежностей потрібні додаткові дослідження.

У випадку, коли в районі екстреного розходження знаходиться навігаційна лінійна розподілена небезпека (рис. 2.2), вибір курсу розходження здійснюється з таких міркувань.

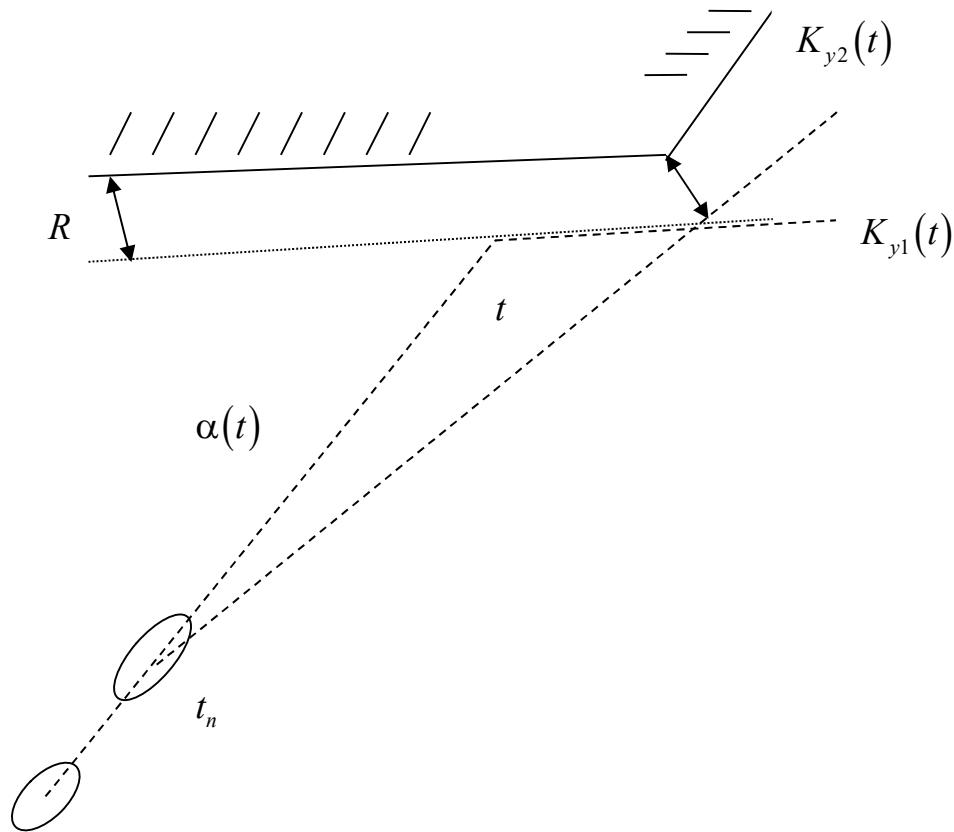


Рис. 2.2 – Вибір курсу розходження за наявності лінійної розподіленої небезпеки

Як і у разі точкової небезпеки, існує дві альтернативні стратегії розходження. Згідно з першою судно слідує оптимальним курсом  $K_{op}(t) = \alpha(t)$  до моменту часу  $t$ , після чого слідує курсом  $K_{y1}(t)$  до кінця лінійної ділянки небезпеки. У разі другої стратегії судно у початковий момент часу  $t_n$ , лягає на граничний курс  $K_{y2}(t)$  і слідує до закінчення розходження.

Для вибору кращої стратегії необхідно розробити відповідну аналітичну процедуру.

Другим вирішальним фактором, що впливає на вибір оптимального курсу ухилення в разі надмірного зближення суден, є наявність судна, що заважає, в районі маневрування.

Припустимо, що оперуюче судно  $VS_{op}$  ухиляється від небезпечної цілі  $Trg_{den}$  оптимальним курсом, що дорівнює пеленгу з цілі на оперуюче судно, тобто  $K_{yop} = \alpha(t)$ . Однак є заважаюче судно  $VS_m$ , яке небезпечно зближується з судном, що оперує, під час слідування останнього  $VS_{op}$  курсом  $K_{yop}$ , як показано на рис. 2.3. Як випливає із зазначеного рисунка, дистанція найкоротшого зближення оперуючого судна з судном, що заважає, менше гранично допустимого значення. Граничними відносними курсами відносно до судна, що заважає, є  $K_{yotpr}$  і  $K_{otyst}$ .

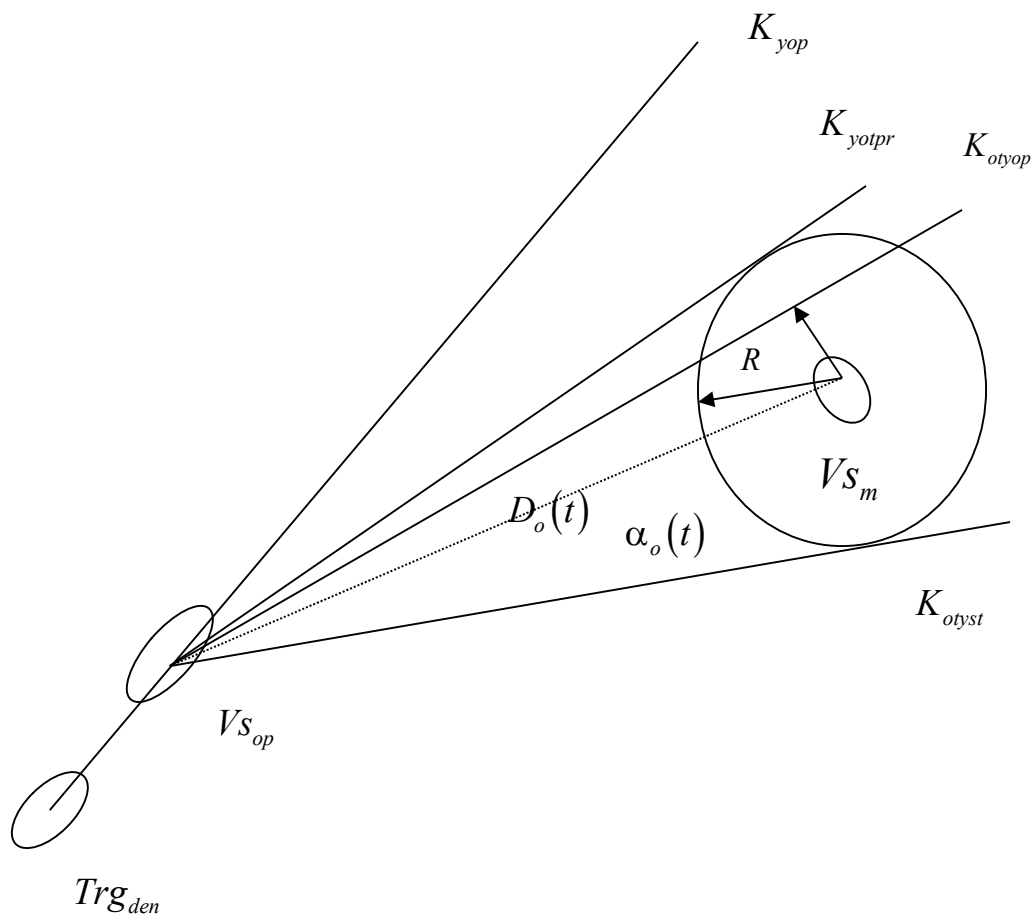


Рис. 2.3 – Вибір курсу розходження за наявності судна, що заважає

Як впливає з рис. 2.3, значення граничних відносних курсів  $K_{yotpr}$  і  $K_{otyst}$  визначаються з наступних співвідношень:

$$K_{otyst} = \alpha_o(t) + \arcsin \frac{R}{D_o(t)},$$

$$K_{yotpr} = \alpha_o(t) - \arcsin \frac{R}{D_o(t)},$$

де  $\alpha_o(t)$  і  $D_o(t)$  – відповідно пеленг і дистанція до судна, що заважає.

Підмножина  $M_n$  істинних курсів оперуючого судна, які є неприпустимими через небезпечне зближення з судном, що заважає, визначається співвідношенням:

$$M_n = \{K_{ym}^*, K_{ym*}\},$$

де  $K_{ym}^*$  і  $K_{ym*}$  – верхня та нижня межі допустимих істинних курсів.

Якщо врахувати співвідношення між відносними та істинними курсами, можна отримати рівності:

$$K_{ym}^* = K_{otyst} + \arcsin \left[ \rho^{-1} \sin(K_c - K_{otyst}) \right],$$

$$K_{ym*} = K_{yotpr} + \arcsin \left[ \rho^{-1} \sin(K_c - K_{yotpr}) \right].$$

Таким чином, допустимими відносно заважаючого судна курсами ухилення оперуючого судна.  $K_y$  є ті, які відповідають умові:

$$K_y \notin \{K_{ym}^*, K_{ym*}\}.$$

Очевидно, найближче до оптимального курсу ухилення  $K_{yop}$  будуть граничні допустимі курси  $K_{ym}^*$  і  $K_{ym^*}$ . Як курс ухилення  $K_y$  оперуючого судна за наявності судна, що заважає, слід вибрати гранично допустимий курс, мінімально відмінний від значення  $K_{yop}$ . Аналітично це виражається так:

$$K_y = K_{ym}^*, \quad \text{за} \quad |K_{ym}^* - K_{yop}| < |K_{ym^*} - K_{yop}|,$$

$$K_y = K_{ym^*}, \quad \text{за} \quad |K_{ym}^* - K_{yop}| \geq |K_{ym^*} - K_{yop}|.$$

У ситуаціях, які характеризуються одночасно наявністю навігаційних небезпек і суден, вибір курсу ухилення, що мінімально відрізняється від оптимального, проводиться аналогічно.

Припустимо, є лінійна розподілена небезпека і судно, що заважає (рис. 2.4). Для попередження посадки судна, що оперує, на міліну отримані граничні істинні курси  $\tilde{K}_{ypr}$  і  $\tilde{K}_{yst}$ , які розраховуються за відомих координат точок зламу А і В (рис. 2.4). Для того щоб не зіткнутися з судном, що заважає, необхідно за раніше отриманими формулами розрахувати граничні допустимі курси  $K_{ym}^*$  і  $K_{ym^*}$ . А для того, щоб безпечно розійтися із судном, що заважає, і не потрапити на міліну необхідно, щоб курс ухилення оперуючого судна  $K_y$  задовольняв наступним вимогам:

$$K_y \notin \{K_{ym^*}, K_{ym}^*\},$$

$$K_y \notin \{\tilde{K}_{ypr}, \tilde{K}_{yst}\}.$$

Тоді оптимальним курсом ухилення  $\tilde{K}_{yop}$  є курс, який, по-перше, не належить об'єднанню підмножин  $\{K_{ym^*}, K_{ym}^*\}$  і  $\{\tilde{K}_{ypr}, \tilde{K}_{yst}\}$ , а також, по-друге, має мінімальне відхилення від курсу  $K_{yop}$ , що дорівнює пеленгу з цілі на судно,

тобто:

$$\tilde{K}_{yop} \notin \left( \left\{ \tilde{K}_{ypr}, \tilde{K}_{yst} \right\} \cup \left\{ K_{ym*}, K_{ym}^* \right\} \right),$$

$$Abs(\tilde{K}_{yop} - K_{yop}) = \min.$$

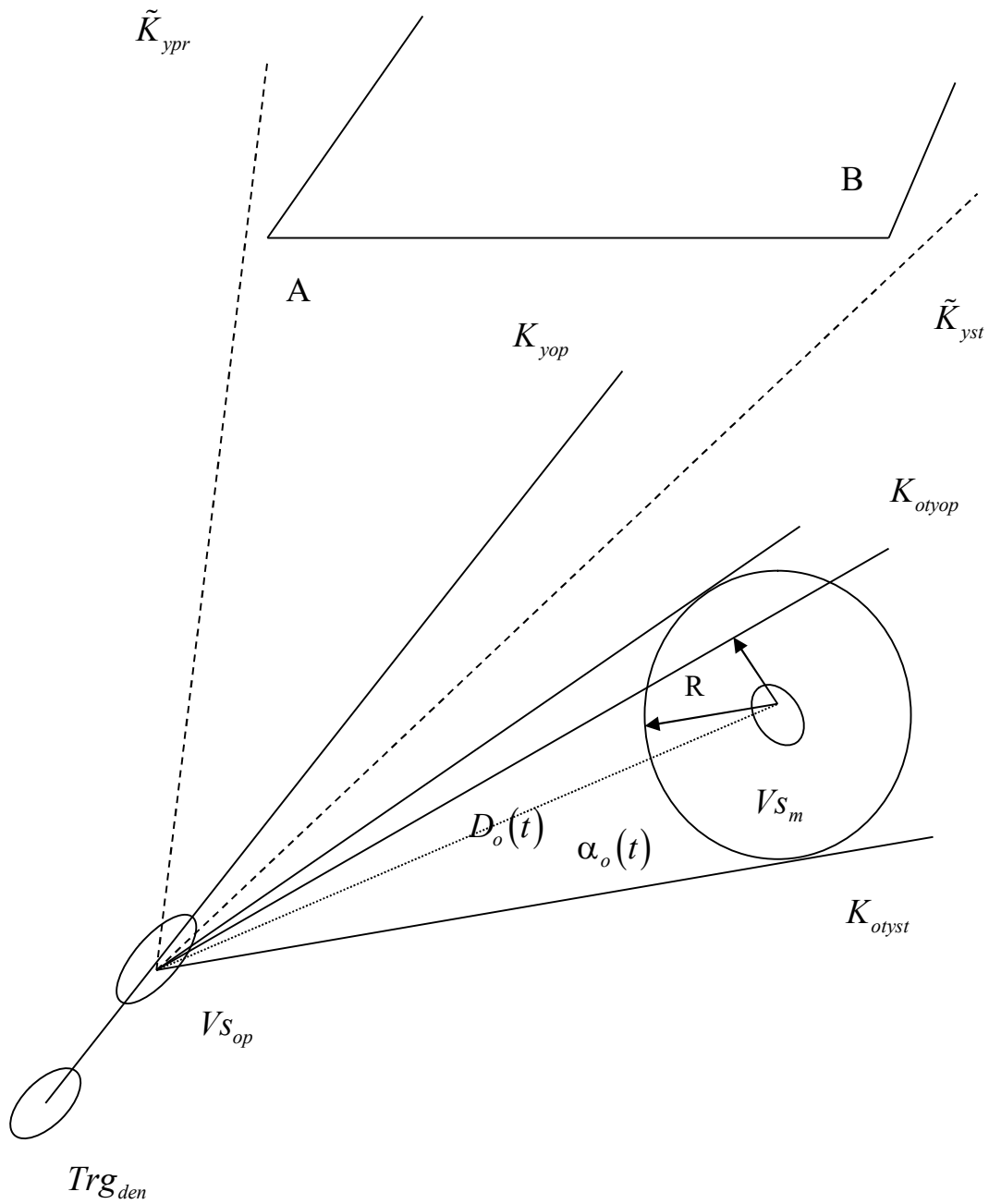


Рис. 2.4. Вибір курсу розходження за наявності заважаючого судна та навігаційної розподіленої небезпеки

На рис. 2.4. якщо підмножини курсів  $\{K_{ym*}, K_{ym}^*\}$  і  $\{\tilde{K}_{ypr}, \tilde{K}_{yst}\}$  не перетинаються, тобто  $\{\tilde{K}_{ypr}, \tilde{K}_{yst}\} \cap \{K_{ym*}, K_{ym}^*\} = \emptyset$ , то оптимальним курсом  $\tilde{K}_{yop}$  є граничний курс  $\tilde{K}_{yst}$ .

2.3. Розрахунок параметрів маневру повернення судна на задану траєкторію руху після розходження з ціллю

У найпростішому випадку, коли ситуація небезпечного зближення виникає у відкритому морі за відсутності інших суден у районі можливого зіткнення, в разі вибору лише безпечного ухилення, а не оптимального маневру розходження, а також у разі зближення суден на зустрічних курсах, можна вважати, що небезпека зіткнення існує лише на ділянці ухилення.

У загальному випадку загроза зіткнення найімовірніша під час плавання у стиснених водах, що характеризуються високою щільністю інтенсивності руху суден та наявністю численних навігаційних небезпек. У таких умовах плавання вихід на програмну траєкторію є частиною стратегії безпечного розходження суден. Більше того, навіть на вільній від заважаючих суден і навігаційних небезпек акваторії, в разі небезпечного зближення суден на курсах, що перетинаються, і при обгоні зіткнення можливі, як на ділянці ухилення, так і на ділянці повернення на програмну траєкторію руху.

У роботах [24, 25] до стратегії розходження крім ділянки ухилення судна із заданою траєкторією було також включено ділянку повернення на неї, а розрахунок параметрів стратегії проводився з урахуванням обмежень на безпечне розходження для обох ділянок.

Під час детального дослідження проблеми попередження зіткнень суден [24] було встановлено, що залежно від початкової відносної позиції пари суден, що небезпечно зближуються, параметрів їх руху та інерційних характеристик, судна можуть перебувати в різних за загрозою зіткнення підмножинах

початкових позицій, що вимагає застосування індивідуальних стратегій розходження. Декомпозиція множини початкових позицій на підмножини  $P_{ni}$  ( $i = 1 \dots 3$ ) проводиться за допомогою двох гранично допустимих дистанцій  $l_{d1}$  і ( $l_{d1} > l_{d2}$ ), які розраховуються за допомогою спеціальної процедури.

У підрозділі 2.1 вказувалося, що у разі, якщо судно здатне розійтися з ціллю в дистанції не меншій від гранично допустимої дистанції  $l_{d1}$ , то реалізувалася підмножина початкових позицій  $P_{n1}$ , якому відповідає перша стратегія розходження  $D_1(t_y, K_y)$ . Ця стратегія полягає в тому, що незалежно від співвідношення швидкостей суден розраховується маневр, який містить момент початку ділянки ухилення  $t_y$  та курс ухилення  $K_y$ , що дозволяють судну розійтися з ціллю в дистанції  $l_{d1}$ .

У разі, якщо судно з початкової позиції за будь-якого курсу ухилення не може забезпечити дистанцію найкоротшого зближення  $D_{\min}$  меншу від першої гранично допустимої дистанції  $l_{d1}$ , але більшу, ніж величина  $l_{d2}$ , то має місце підмножина початкових позицій  $P_{n2}$ , якому відповідає друга стратегія розходження  $D_2(K_y = K_{extr})$ , що забезпечує найбільшу безпеку розходження суден максимальною дистанцією найкоротшого зближення  $D_{\min}$ . Оскільки  $\max[D_{\min}]$  досягається за екстремального курсу  $K_{otextr}$ , то цей курс є параметром стратегії  $D_2$ , а ухилення починається у нульовий момент часу.

Найбільш небезпечна ситуація, коли судно потрапляє у підмножину небезпечних позицій  $P_{n3}$  ( $\max[D_{\min}] < l_{d2}$ ), і виникає ситуація надмірного зближення, в якій судно мінімізує відносну швидкість зближення з ціллю збільшуючи інтервал часу до позиції мінімального зближення. Для цього судно лягає на курс, що дорівнює зворотному пеленгу на друге судно, залучаючи друге судно у взаємодію, щоб спільними зусиллями компенсувати ситуаційне збурення. У цьому полягає третя стратегія розходження  $D_3$ .

Якщо звернутися до аналітичних виразів, то, як показано в книзі [26],

курс ухилення  $K_y$  першої стратегії розходження  $D_1(t_y, K_y)$  за швидкості судна меншої за швидкість цілі визначається виразом:

$$\begin{aligned}\tilde{K}_{y(s)1} &= \tilde{K}_{oty(s)} + \arcsin\left[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(s)})\right], \\ \tilde{K}_{y(s)2} &= \tilde{K}_{oty(s)} + \pi - \arcsin\left[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(s)})\right], \\ \tilde{K}_{y(p)1} &= \tilde{K}_{oty(p)} + \arcsin\left[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(p)})\right], \\ \tilde{K}_{y(p)2} &= \tilde{K}_{oty(p)} + \pi - \arcsin\left[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(p)})\right],\end{aligned}$$

де  $\tilde{K}_{y(s)}$  і  $\tilde{K}_{y(p)}$  – курси судна відповідно під час ухилення вправо та вліво;

$K_c$  і  $\rho$  – відповідно курс цілі та відношення швидкості судна до швидкості цілі.

Якщо швидкість судна перевищує швидкість цілі, справедливим є вираз:

$$\begin{aligned}\tilde{K}_{y(s)} &= \tilde{K}_{oty(s)} + \arcsin\left[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(s)})\right], \\ \tilde{K}_{y(p)} &= \tilde{K}_{oty(p)} + \arcsin\left[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(p)})\right],\end{aligned}$$

причому відносні курси ухилення  $\tilde{K}_{oty(s)}$  і  $\tilde{K}_{oty(p)}$  визначаються виразами:

$$\tilde{K}_{oty(s)} = \alpha_y + \arcsin\left(\frac{l_{d1}}{l_y}\right), \quad \tilde{K}_{oty(p)} = \alpha_y + \arcsin\left(\frac{l_{d1}}{l_y}\right),$$

де  $l_y$  – дистанція між суднами на момент початку ухилення.

Момент початку ухилення  $t_y$  розраховується, виходячи з помітності ухилення судна від початкового курсу.

Стратегія розходження  $D_2(K_y = K_{extr})$  містить два параметри: час початку ухилення, що дорівнює початковому моменту часу  $t_y = t_0$  та курс ухилення  $K_y$ , який забезпечує  $\max D_{\min}$ . Це досягається на екстремальних відносних курсах:

$$K_{ot\min} = \pi + K_c - \arcsin \rho$$

або

$$K_{ot\max} = \pi + K_c + \arcsin \rho.$$

Якщо через  $K_{extr}$  позначити екстремальний відносний курс ( $K_{ot\min}$  або  $K_{ot\max}$ ), на якому дистанція найкоротшого зближення  $D_{\min}$  є максимальною, то вираз для  $\max D_{\min}$  має такий вигляд, враховуючи, що ухилення судна провадиться в початковий момент часу:

$$\max D_{\min} = l_n \left| \sin(K_{extr} - \alpha_n) \right|,$$

де  $l_n$  і  $\alpha_n$  – дистанція та пеленг на ціль у початковий момент часу. Очевидно, що під час врахування виразів для  $K_{ot\min}$  в  $K_{ot\max}$  справедливим є співвідношення  $\sin(K_{extr} - \alpha_n) < 1$ , отже,  $\max D_{\min} < D_n$ .

Даним екстремальним відносним курсам ухилення, як впливає з тієї ж книги [26], відповідають справжні курси ухилення:

$$K_{y\min} = K_c + \arccos(\rho) \quad \text{і} \quad K_{y\max} = K_c - \arccos(\rho).$$

У разі коли початкова позиція суден належить підмножині небезпечних ситуацій  $P_{n3}$  та використовується стратегія  $D_3[K_{y1} = \alpha(t) + \pi]$ , яка

застосовується у початковий момент часу, а поточний курс  $K_{y1}$  дорівнює  $K_{y1} = \alpha(t) + \pi$ , причому він змінюється так само, як і поточний пеленг  $\alpha(t)$ . У цьому випадку враховуючи, що курс цілі  $K_c$  незмінний, вибір курсу  $K_{y1} = \alpha(t) + \pi$  веде до мінімальної небезпеки зіткнення, оскільки мінімізує скорочення дистанції між судном та ціллю.

Повернення судна на програмну траєкторію руху після розходження з ціллю залежить від стратегії розходження, що застосовується. Так, під час використання першої стратегії розходження вибирається курс повернення  $K_b$  судна на задану траєкторію, який приблизно на  $40^\circ$  відрізняється від програмного курсу, причому момент повороту  $t_b$  на цей курс, який забезпечує безпечне досягнення заданої траєкторії, обчислюється за допомогою виразу:

$$t_b = t_y + \frac{l_{d1} + l_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otb} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})},$$

де  $K_{otn}$ ,  $K_{oty}$  і  $K_{otb}$  – відповідно відносні курси початковий, ухилення та повернення;

$V_{otn}$  і  $V_{oty}$  – відносні швидкості відповідно початкова та ухилення.

У разі розходження судна з ціллю за допомогою другої стратегії після моменту найкоротшого зближення на дистанцію  $\max D_{\min}$  судно продовжує слідувати екстремальним курсом  $K_y = K_c \pm \arccos(\rho)$ , збільшуючи дистанцію до цілі, поки не настане момент часу  $t_b^*$ :

$$t_b^* = t_y + \frac{l_{d1} + l_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otb} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(K_{extr} - K_{otb})}.$$

У цей момент судно лягає на курс повернення  $K_b$  на програмну

траєкторію руху.

Якщо для розходження суден реалізується третя стратегія розходження, то судно йде від цілі на курсі, що дорівнює зворотному пеленгу на ціль, збільшуючи дистанцію до цілі, поки дистанція  $D$  між судном та ціллю не стане рівною  $l_{d2}$ . У цьому випадку судна, що розходяться, потрапляють з третьої підмножини відносних позицій  $P_{n3}$  у другу  $P_{n2}$ , в якій оптимальною є друга стратегія  $D_2(K_y = K_{extr})$ .

Тому в момент часу, коли  $D = l_{d2}$ , судну слід змінити свій курс на екстремальний  $K_y = K_c \pm \arccos(\rho)$  і слідувати ним, доки не стане справедливою рівність  $D = l_{d1}$ , після чого слід виконати розрахунок поточного значення пеленгу на ціль і виконати розрахунок моменту часу  $t_b^*$  повороту на курс повернення  $K_b$  за вищенаведеною формулою.

Максимальна безпека повернення судна на програмну траєкторію запропонованим способом очевидна, проте вона і найбільш економічна, особливо в разі реалізації третьої стратегії розходження, коли швидкість зміни дистанції між судном та ціллю є мінімальною.

Зазначені висновки з виходу на програмну траєкторію щодо реалізації гнучких стратегій розходження наведено у роботі [24].

Однак комп'ютерне імітаційне моделювання, яке було виконано на базі навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000, застосування гнучких стратегій розходження показало, що під час розходження суден на невеликих відстанях за умови успішного ухилення може виникати загроза зіткнення суден під час повернення їх на програмну траєкторію руху, що зумовлює необхідність їх узгоджених дій на цьому етапі процесу розходження.

Здійснюючи ухилення, судно реалізує криволінійну траєкторію спочатку в один бік, який є ділянкою ухилення, а потім змінює її в інший бік, виходячи на курс повернення до програмної траєкторії, як показано на рис. 2.5. За невеликих початкових відстаней немає прямолінійних ділянок ухилення, тобто перехідний процес ухилення трансформується у перехідний процес повернення

до програмної траєкторії. Для такого маневру розходження немає аналітичного виразу для розрахунку моментів часу переходу від ухилення до повернення на програмну траєкторію.

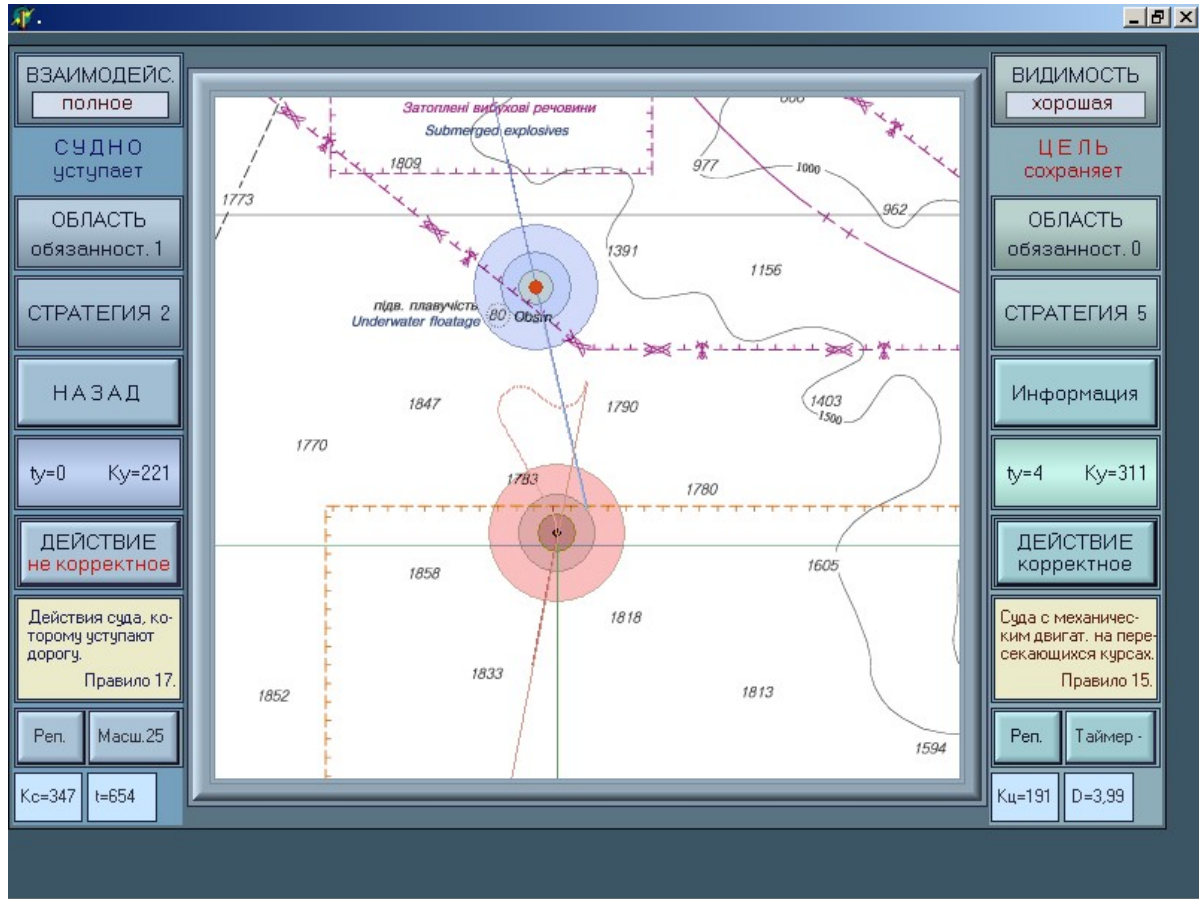


Рис. 2.5 – Повернення судна на програмну траєкторію руху

На рис. 2.6 звертаємо увагу на те, що ціль виконувала ухилення в лівий бік, а для повернення на програмну траєкторію змінювала курс управо без прямолінійної ділянки між ухиленням та поверненням на програмну траєкторію. Судно робило ухилення теж у лівий бік, але для повернення на задану траєкторію продовжувало рух у той самий бік, здійснюючи повну циркуляцію.

Без належних аналітичних розрахунків, які б забезпечувала математична модель, в результаті наведеного прикладу маневру розходження судна можуть зіткнутися на етапі повернення на задані траєкторії руху.

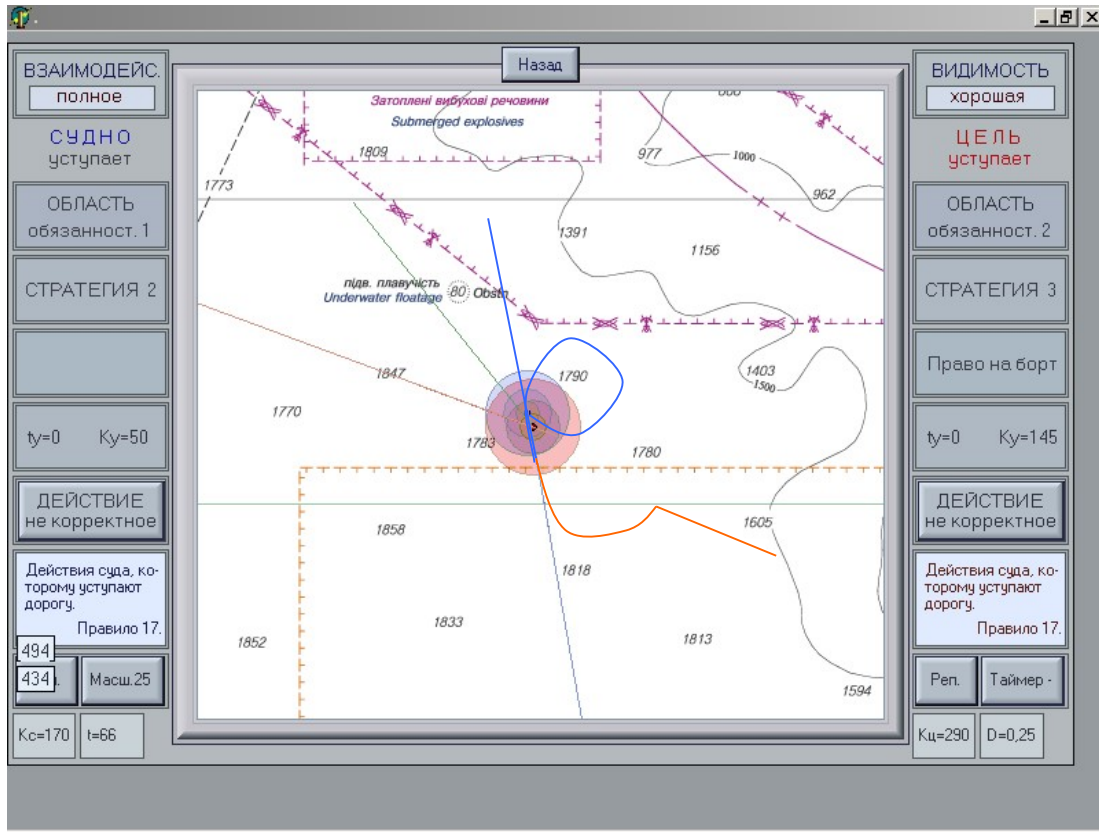


Рис. 2.6 – Використання судном циркуляції під час розходження

На рис. 2.7 показано ситуацію небезпечного зближення суден на малих відстанях. Для безпечного розходження судна виконали циркуляції у різні сторони (судно вправо, а ціль вліво), у результаті, повертаючись на задані траєкторії, судна опинилися у ситуації неминучого зіткнення.

Ситуація обгону, коли судно, що обганяє, небезпечно зближуючись, не виконує маневру ухилення, і судно, яке обганяють, змушене поступитися дорогою, здійснюючи циркуляцію вправо (рис. 2.8). Завершення маневру може призвести до зіткнення суден в разі неточного розрахунку моменту часу початку циркуляції.

Таким чином, залежно від початкової позиції судна та цілі, а також від обраних ними стратегій розходження, ділянка виходу на задану траєкторію руху може реалізовуватись різними способами. Слід зазначити, що це питання має велике значення, і потребує глибшого дослідження.

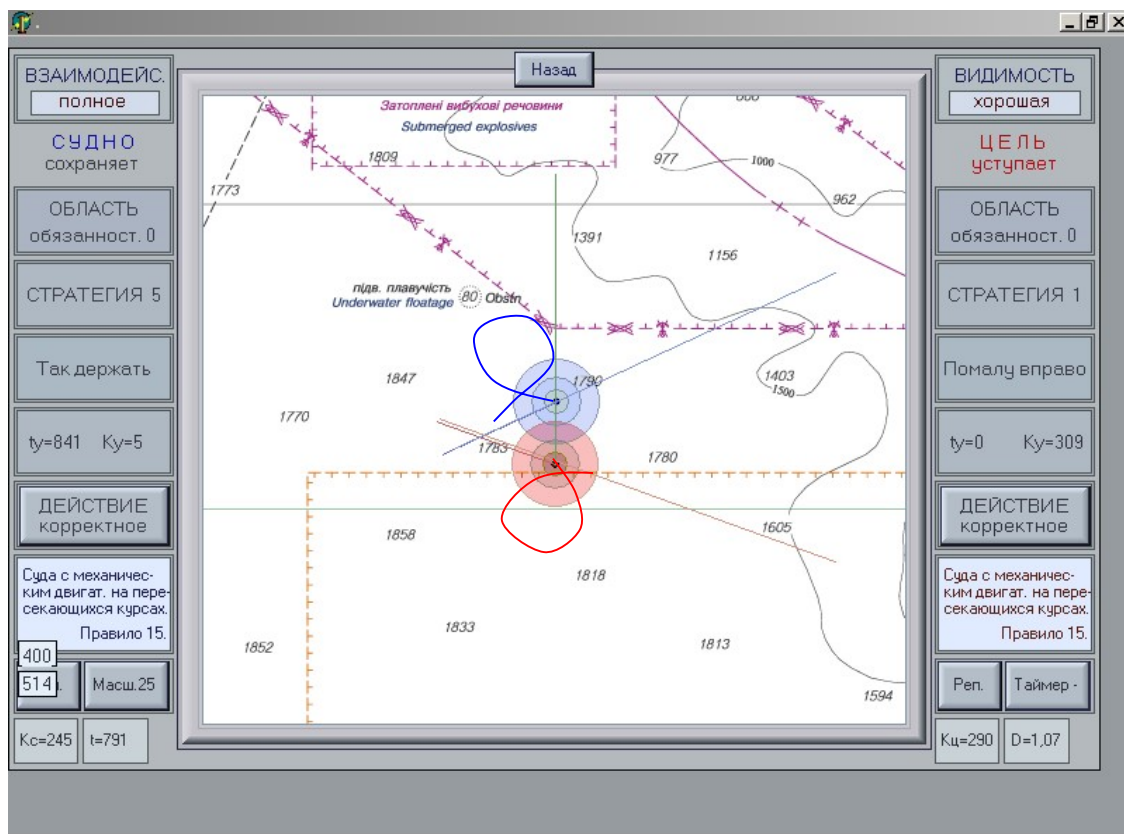


Рис. 2.7 – Використання суднами циркуляції під час розходження

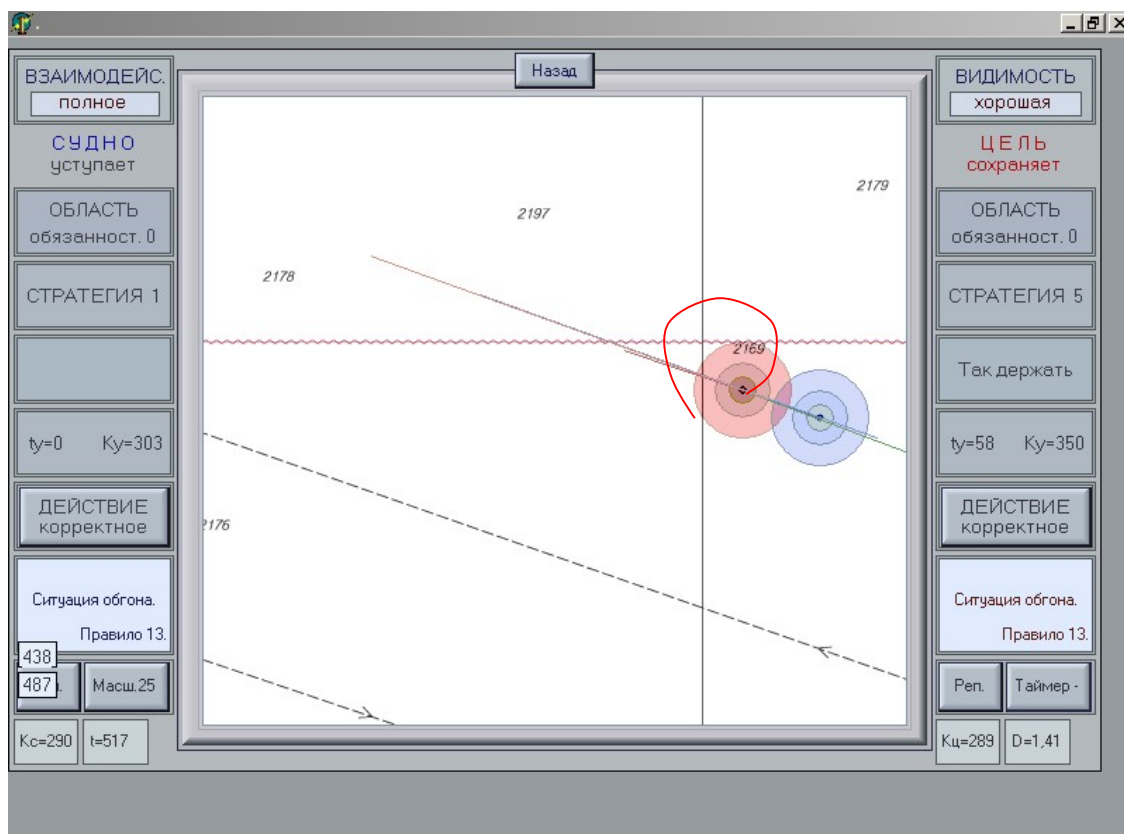


Рис. 2.8 – Розходження суден у ситуації обгону

## Висновки з другого розділу дисертації

У другому розділі розглянуто основи теоретичної бази формалізації процесу розходження суден, що використовує методи теорії динамічних  $n$ -керованих систем. Показано, що маневр виходу судна на програмну траєкторію руху після безпечного відхилення від цілі вимагає використання теорії мінімальних динамічних систем, що складаються з двох суден. Розглянуто три можливі стратегії розходження в залежності від рівня небезпеки початкової ситуації зближення, які передбачають різні маневри повернення на програмні траєкторії.

Показано, що на вибір типу стратегії розходження судна з ціллю впливають також варіант взаємодії, що реалізувався, і співвідношення швидкостей, причому виявлено три типи взаємодії мінімальних динамічних систем.

У розділі розглянуто питання вибору оптимального маневру ухилення судна з урахуванням навігаційних небезпек і суден, що заважають, під час розходження судна і цілі на малих відстанях. В разі екстрених розходжень, коли координація взаємодії суден не регламентується, оптимальним є курс судна, що дорівнює пеленгу з цілі на судно. Показано, що наявність навігаційних небезпек і суден, що заважають, не дозволяє слідувати судну оптимальним курсом ухилення, вимагаючи зробити вибір допустимого курсу ухилення, що мінімально відрізняється від оптимального.

Розглянуто ситуації наявності навігаційних небезпек у районі екстреного розходження, отримано процедури вибору оптимального курсу ухилення для випадків точкової навігаційної небезпеки та лінійної розподіленої небезпеки із заданими координатами кінцевих точок.

Отримано процедуру вибору оптимального ухилення судна під час екстреного маневрування з урахуванням наявності судна, що заважає, яку можна використовувати і за наявності декількох суден, що заважають.

Здійснено дослідження ситуації, коли в районі маневрування одночасно

знаходяться точкова навігаційна небезпека й судно, що заважає, та отримана процедура вибору оптимального курсу ухилення. Також розглянуто ситуацію, коли екстрене розходження судна з ціллю відбувається за наявності судна, що заважає, і лінійної розподіленої навігаційної небезпеки. Сформовано аналітичну процедуру розрахунку параметрів оптимального курсу ухилення.

У розділі є підрозділ, присвячений питанню розрахунку параметрів маневру повернення судна на задану траєкторію руху після розходження з ціллю під час використання різних типів стратегії ухилення. У підрозділі наголошується, що комп'ютерне імітаційне моделювання процесу розходження показало, що під час розходження суден на невеликих дистанціях за успішного ухилення може виникати загроза зіткнення під час їх повернення на програмну траєкторію руху, що зумовлює необхідність їх узгоджених дій на цьому етапі процесу розходження. Показано такі типові ситуації. Зазначено, що це питання має велике значення, і щодо нього необхідно провести детальні дослідження.

Основні результати розділу надруковані у роботах [134-137].

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИБОРУ МАНЕВРА ПОВЕРНЕННЯ СУДЕН НА ПРОГРАМНІ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ЗА МАЛІХ ПОЧАТКОВИХ ДИСТАНЦІЙ

### 3.1. Вибір маневру повернення судна на програмну траєкторію руху без координат з ціллю

У ситуаціях, коли початкова інтенсивність ситуаційного збурення  $\tilde{\omega}_0$  судна та цілі дорівнює нулю ( $\tilde{\omega}_0 = 0$ ), тобто вони перебувають у першій області взаємних обов'язків і можуть розійтися на мінімальній дистанції  $\min L$ , яка переважає гранично допустиму  $L_d$  ( $\min L \geq L_d$ ) маневр повернення судна на програмну траєкторію руху описано у підрозділі 2.1. Там же наведено аналітичні вирази розрахунку його параметрів.

Якщо ситуація небезпечного зближення характеризується початковою інтенсивністю ситуаційного збурення  $\tilde{\omega}_0 > 0$ , то судно не може розійтися з ціллю на гранично допустимій дистанції ( $\min L < L_d$ ) і початок маневру виходу судна на програмну траєкторію руху здійснюється в момент часу, коли поточна дистанція  $L_t$  зросте до значення  $L_d$  ( $L_t = L_d$ ).

Маневр повернення судна на програмну траєкторію руху, як заключний етап процесу розходження судна з ціллю, характеризується початковою ситуацією, що включає відносне положення судна та цілі, а також їхні істинні та відносні параметри руху [129].

Особливістю початкової ситуації є те, що початкова дистанція  $L_o$  між судном і ціллю, як зазначалося, дорівнює гранично допустимій дистанції  $L_d$ , що характеризує завершення етапу ухилення (рис. 3.1) процесу розходження та початку етапу повернення на програмну траєкторію. Причому до початкового моменту дистанція між судном та ціллю зростала.

Першою обов'язковою умовою безпечного повернення судна на

програмну траєкторію руху є збільшення дистанції  $L_t$  між суднами, тобто  $\frac{dL_t}{dt} > 0$  ( $L_t > L_d$ ), враховуючи що судно починає поворот для повернення у бік програмної траєкторії.

Як впливає з рисунка, якщо судно у відносному русі переміщатиметься траєкторією 0, то дистанція між судном і ціллю на етапі повернення на програмну траєкторію буде незмінною і ситуація небезпечного зближення не виникне. Якщо ж судно переміщуватиметься траєкторією 1, то воно зближується з ціллю і виникає загроза зіткнення. У разі, коли відносне переміщення судна відбувається за траєкторією 2, воно віддалятиметься від цілі.

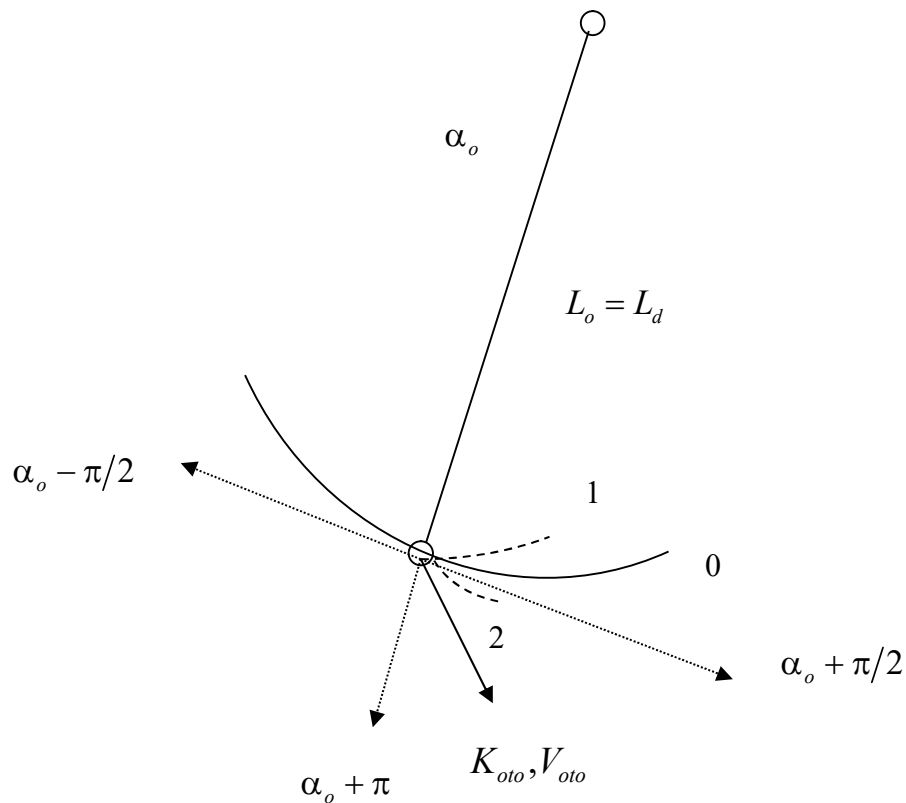


Рис. 3.1 – Початкова ситуація маневру повернення судна на програмну траєкторію руху

Сформулюємо умову безпечного виходу судна на програмну траєкторію руху, використовуючи рис. 3.1. Як впливає з рисунка, поточна дистанція  $L_t$  на етапі повернення судна на програмну траєкторію руху збільшуватиметься,

якщо початковий відносний курс  $K_{oto}$  поміщений у секторі від значення  $\alpha_o + \pi/2$  до значення  $\alpha_o + \pi$ , і він збільшується в часі, тобто  $K_{oto} \in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi]$  и  $\omega_{ot} = \frac{dK_{ot}}{dt} > 0$ .

Також дистанція  $L_t$  збільшуватиметься, якщо початковий відносний курс  $K_{oto}$  належить підмножині курсів від значення  $\alpha_o + \pi$  до значення  $\alpha_o - \pi/2$  та відносний курс  $K_{oto}$  зменшується, що аналітично виражається так:  $K_{oto} \in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2]$  и  $\omega_{ot} < 0$ .

Початкові ситуації, що характеризуються співвідношеннями  $K_{oto} \in [\alpha_o - \pi/2, \alpha_o]$  и  $\omega_{ot} > 0$ , а також  $K_{oto} \in [\alpha_o, \alpha_o + \pi/2]$  і  $\omega_{ot} < 0$  відрізняються тим, що поточна дистанція скорочується, тобто  $\frac{dL_t}{dt} < 0$ , як показано на рис. 3.2.

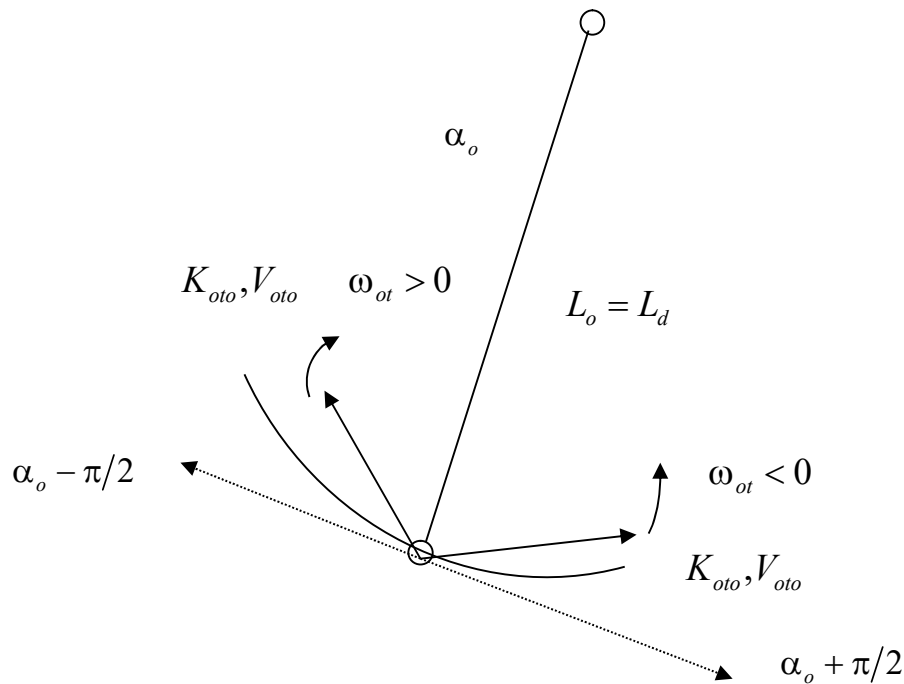


Рис. 3.2 – Початкові неприпустимі ситуації для безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію руху

Однак є ситуації, коли зміна поточної дистанції не є очевидною. До таких ситуацій відносяться такі, що визначаються одним із наступних чотирьох співвідношень:

$$K_{oto} \in [\alpha_o - \pi/2, \alpha_o] \text{ і } \omega_{ot} < 0; K_{oto} \in [\alpha_o, \alpha_o + \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} > 0;$$

$$K_{oto} \in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi] \text{ і } \omega_{ot} < 0; K_{oto} \in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} > 0.$$

Дані ситуації показані на рис. 3.3.

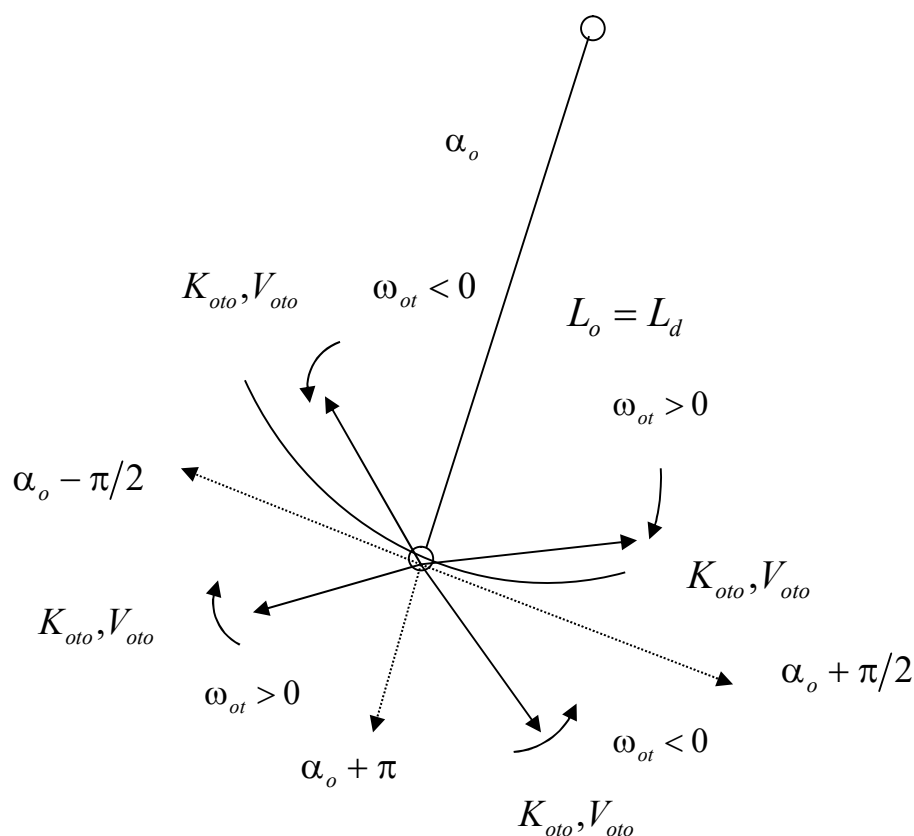


Рис. 3.3 – Початкові невизначені ситуації для безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію руху

Таким чином, розрізнятимемо три підмножини ситуацій залежно від співвідношення величин початкового відносного курсу  $K_{oto}$  та відносної

кутової швидкості  $\omega_{ot}$ .

До першої підмножини  $Mn_1$  відносяться безпечні ситуації  $G$ , за яких забезпечене гарантоване зростання дистанції між судном і ціллю, тобто  $\frac{dL_t}{dt} > 0$ .

Друга підмножина  $Mn_2$  складають ситуації, за яких дистанція між судном та ціллю скорочується ( $\frac{dL_t}{dt} < 0$ ). І, нарешті, до третьої підмножини ситуацій.  $Mn_3$  належать ті ситуації, для яких можливе як збільшення дистанції  $L_t$ , так і її зменшення.

У загальному випадку належність ситуації  $G$  до однієї із підмножин  $Mn_i$  визначається наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned}
 G \in Mn_1, \text{ якщо } \{ K_{oto} \in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi] \text{ і } \omega_{ot} > 0 \}, \\
 \text{або } \{ K_{oto} \in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} < 0 \}; \\
 G \in Mn_2, \text{ якщо } \{ K_{oto} \in [\alpha_o - \pi/2, \alpha_o] \text{ і } \omega_{ot} > 0 \}, \\
 \text{або } \{ K_{oto} \in [\alpha_o, \alpha_o + \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} < 0 \}; \\
 G \in Mn_3, \text{ якщо } \{ K_{oto} \in [\alpha_o - \pi/2, \alpha_o] \text{ і } \omega_{ot} < 0 \}, \\
 \text{або } \{ K_{oto} \in [\alpha_o, \alpha_o + \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} > 0 \}, \\
 \text{або } \{ K_{oto} \in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi] \text{ і } \omega_{ot} < 0 \}, \\
 \text{або } \{ K_{oto} \in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} > 0 \}.
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Зазначені умови визначають можливість виконання безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію з урахуванням того, що дистанція між суднами досягла на етапі ухилення величини, що дорівнює гранично допустимому значенню  $L_d$ .

Другою важливою обставиною є необхідний бік повороту судна для виходу на програмну траєкторію, який визначається на відміну від

попереднього випадку в істинному русі, і залежить від боку його ухилення. Ця обставина визначає знак кутової швидкості повороту судна під час виконання маневру повернення програмну траєкторію.

Очевидно, якщо в результаті ухилення під час розходженні судно виявилось праворуч від програмної траєкторії руху, то для виходу на неї судно має виконувати поворот вліво. Позначимо через  $\Delta_y$  характеристику ухилення судна, причому  $\Delta_y > 0$  в разі ухилення судна вправо, та  $\Delta_y < 0$  під час ухилення вліво. Кутова швидкість повороту судна  $\omega_V$  є додатною ( $\omega_V > 0$ ), якщо воно повертає вправо, і від'ємна ( $\omega_V < 0$ ) в разі його повороту вліво.

Таким чином, справедлива умова визначення знаку кутової швидкості судна  $\omega_{vb}$  під час вибору маневру виходу задану траєкторію:

$$\text{sign}(\omega_{vb}) = -\text{sign}(\Delta_y). \quad (3.2)$$

Спільне врахування умов (3.1) та (3.2) дозволяє вибрати безпечний маневр виходу судна на програмну траєкторію руху. Однак для цього необхідно знайти вирази для початкового курсу  $K_{oto}$  та відносної кутової швидкості  $\omega_{ot}$ .

Вираз для відносного курсу  $K_{oto}$  має такий вигляд [26]:

$$K_{oto} = \arcsin \left[ \frac{V_v \sin K_{vo} - V_c \sin K_{co}}{V_{oto}} \right],$$

де  $K_{vo}$ ,  $V_v$ ,  $K_{co}$  і  $V_c$  – значення початкового курсу та швидкості відповідно судна та цілі;

$V_{oto}$  – початкова відносна швидкість, причому

$$V_{oto} = \left[ V_v^2 + V_c^2 - 2 V_v V_c \cos(K_{vo} - K_{co}) \right]^{1/2}.$$

Для виведення виразу відносної кутової швидкості  $\omega_{ot}$  враховуємо, що

$\omega_{ot} = \frac{dK_{ot}}{dt}$ , а відносний курс  $K_{ot}$  у загальному випадку визначається виразом:

$$K_{ot} = \arcsin \left[ (V_v \sin K_v - V_c \sin K_c) / V_{ot} \right],$$

де  $K_v$  і  $K_c$  – значення поточних курсів відповідно судна та цілі;

$V_{ot}$  – поточна відносна швидкість, причому

$$V_{ot} = \left[ V_v^2 + V_c^2 - 2 V_v V_c \cos(K_v - K_c) \right]^{1/2}.$$

Припустимо, змінюються лише курси суден  $K_v$  і  $K_c$ . У цьому випадку

вираз для першої похідної  $\frac{dK_{ot}}{dt}$  набуває наступного вигляду:

$$\frac{dK_{ot}}{dt} = \left\{ 1 - \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)^2}{V_{ot}^2} \right\}^{-1/2} \cdot \frac{d}{dt} \left[ \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)}{V_{ot}} \right]. \quad (3.3)$$

Введемо такі позначення:

$$A = 1 - \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)^2}{V_{ot}^2}, \quad B = \frac{d}{dt} \left[ \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)}{V_{ot}} \right].$$

Тоді вираз (3.3) набуває вигляду:

$$\frac{dK_{ot}}{dt} = \{A\}^{-1/2} \cdot B. \quad (3.4)$$

Знайдемо вирази для  $A$  і  $B$ . Очевидно:

$$A = \frac{V_{ot}^2 - (V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)^2}{V_{ot}^2} = \frac{V_v^2 + V_c^2 - 2 V_v V_c \cos(K_v - K_c) - (V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)^2}{V_{ot}^2}.$$

або, розкриваючи вираз  $(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)^2$ , отримаємо:

$$A = \frac{V_v^2 + V_c^2 - 2 V_v V_c \cos(K_v - K_c) - (V_v^2 \sin^2 K_v + V_c^2 \sin^2 K_c - 2 V_v V_c \sin K_v \sin K_c)}{V_{ot}^2}.$$

Остаточно:

$$\begin{aligned} A &= \frac{V_v^2 (1 - \sin^2 K_v) + V_c^2 (1 - \sin^2 K_c) - 2 V_v V_c \cos K_v \cos K_c}{V_{ot}^2} = \\ &= \frac{V_v^2 \cos^2 K_v + V_c^2 \cos^2 K_c - 2 V_v V_c \cos K_v \cos K_c}{V_{ot}^2} = \frac{(V_v \cos K_v + V_c \cos K_c)^2}{V_{ot}^2}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Аналогічно знайдемо вираз для  $B$ :

$$\begin{aligned} B &= \frac{d}{dt} \left[ \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)}{V_{ot}} \right] = \frac{\frac{d}{dt} (V_v \sin K_v - V_c \sin K_c) V_{ot} - (V_v \sin K_v - V_c \sin K_c) \frac{d}{dt} V_{ot}}{V_{ot}^2}. \\ B &= \frac{\left( V_v \cos K_v \frac{dK_v}{dt} - V_c \cos K_c \frac{dK_c}{dt} \right) V_{ot} - (V_v \sin K_v - V_c \sin K_c) \frac{d}{dt} V_{ot}}{V_{ot}^2}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Справедливе співвідношення:

$$\frac{d}{dt} V_{ot} = \frac{d}{dt} \left\{ \left[ V_v^2 + V_c^2 - 2 V_v V_c \cos(K_v - K_c) \right]^{1/2} \right\} = \frac{V_v V_c \sin(K_v - K_c) \left( \frac{dK_v}{dt} - \frac{dK_c}{dt} \right)}{V_{ot}}.$$

З урахуванням отриманого виразу, підставляючи в (3.6), знаходимо:

$$B = \frac{\left( V_v \cos K_v \frac{dK_v}{dt} - V_c \cos K_c \frac{dK_c}{dt} \right)}{V_{ot}} - \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c) V_v V_c \sin(K_v - K_c) \left( \frac{dK_v}{dt} - \frac{dK_c}{dt} \right)}{V_{ot}^3}.$$

Підставляємо у формулу (3.4) отриманий вираз та вираз (3.5):

$$\frac{dK_{ot}}{dt} = \frac{dK_{ot}}{dt} = \frac{V_{ot}}{\left( V_v \cos K_v + V_c \cos K_c \right)} \times$$

$$\times \left[ \frac{\left( V_v \cos K_v \frac{dK_v}{dt} - V_c \cos K_c \frac{dK_c}{dt} \right)}{V_{ot}} - \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c) V_v V_c \sin(K_v - K_c) \left( \frac{dK_v}{dt} - \frac{dK_c}{dt} \right)}{V_{ot}^3} \right].$$

Остаточно отримаємо:

$$\frac{dK_{ot}}{dt} = \frac{\left( V_v \cos K_v \frac{dK_v}{dt} - V_c \cos K_c \frac{dK_c}{dt} \right)}{\left( V_v \cos K_v + V_c \cos K_c \right)} -$$

$$- \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c) V_v V_c \sin(K_v - K_c) \left( \frac{dK_v}{dt} - \frac{dK_c}{dt} \right)}{\left( V_v \cos K_v + V_c \cos K_c \right) V_{ot}^2}. \quad (3.7)$$

Отриманий вираз для швидкості зміни відносного курсу  $\frac{dK_{ot}}{dt}$  носить універсальний характер довільного закону зміни курсів судів.

Для оцінювання  $\frac{dK_{ot}}{dt}$  у першому наближенні, цілком прийнятному у багатьох практичних додатках, приймається обертальний рух із постійними кутовими швидкостями  $\omega_v$  і  $\omega_c$ . І тут справедливі такі співвідношення:

$$K_v = K_{v0} + \omega_v t; \quad \omega_v = const; \quad \frac{dK_v}{dt} = \omega_v;$$

$$K_c = K_{co} + \omega_c t; \quad \omega_c = const; \quad \frac{dK_c}{dt} = \omega_c.$$

Базова залежність (3.7) набуває наступного вигляду:

$$\frac{dK_{ot}}{dt} = \frac{V_v \cos(K_{vo} + \omega_v t) \omega_v - V_c \cos(K_{co} + \omega_c t) \omega_c}{V_v \cos K_v + V_c \cos K_c} - \frac{[V_v \sin(K_{vo} + \omega_v t) - V_c \sin(K_{co} + \omega_c t)] V_v V_c \sin(\Delta K_o + \omega_v t - \omega_c t) (\omega_v - \omega_c)}{(V_v \cos K_v + V_c \cos K_c) V_{ot}^2},$$

де  $\Delta K_o = K_{vo} - K_{co}$ .

Якщо позначити  $\Delta\omega = \omega_v - \omega_c$ , то остаточно отримаємо:

$$\omega_{ot} = \frac{dK_{ot}}{dt} = \frac{V_v \cos(K_{vo} + \omega_v t) \omega_v - V_c \cos(K_{co} + \omega_c t) \omega_c}{V_v \cos K_v + V_c \cos K_c} - \frac{[V_v \sin(K_{vo} + \omega_v t) - V_c \sin(K_{co} + \omega_c t)] V_v V_c \sin(\Delta K_o + \Delta\omega t) \Delta\omega}{(V_v \cos K_v + V_c \cos K_c) V_{ot}^2}. \quad (3.8)$$

Перевірка коректності отриманого виразу проводилася за допомогою розрахунку значень відносної кутової швидкості  $\omega_{ot}$ , використовуючи формулу (3.8), а також як різницю відносних курсів в одиницю часу за заданих кутових швидкостей  $\omega_v$  і  $\omega_c$ . Розрахунки здійснювалися на комп'ютері і значення кутової швидкості  $\omega_{ot}$  отримані вказаними способами збігалися, що підтвердило коректність виразу (3.8).

На рис.3.4 показано залежність кутової швидкості  $\omega_{ot}$  від часу, обраний інтервал часу, що дорівнює 1000 с, початкові курси судна та цілі склали  $K_{vo} = 45$ ,  $K_{co} = 40$ , а їхні швидкості  $V_v = 15$ ,  $V_c = 20$ , кутові швидкості дорівнюють відповідно  $\omega_v = 0,5$ , і  $\omega_c = 1,5$ .

Рис. 3.4 містить дві криві, одна з яких розрахована за формулою (3.8), а

друга – різницею відносних курсів. Обидві криві фактично зливаються, спеціально для того, щоб вони були видимими, одна з кривих піднята на графіку на кілька пікселів.

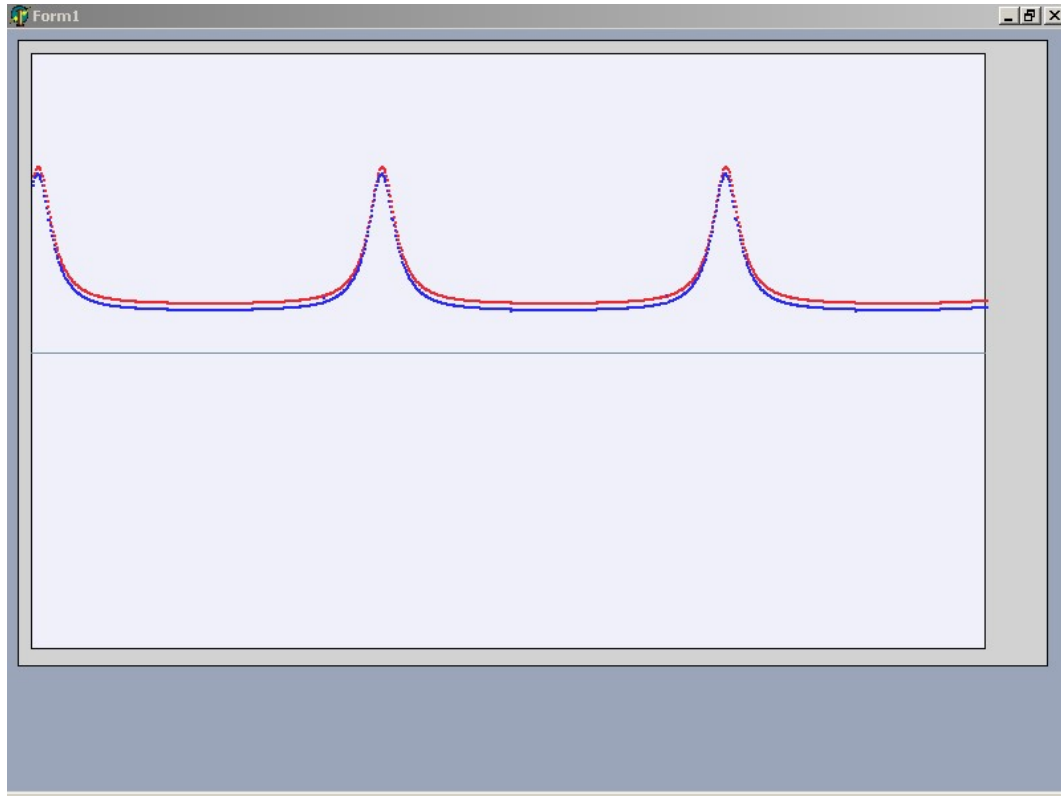


Рис. 3.4 – Залежність відносної кутової швидкості від часу

Розглянемо спільне врахування умови зміни дистанції між судном і ціллю та умови необхідного боку повороту судна, що визначає знак кутової швидкості  $\omega_{vb}$  повернення судна на програмну траєкторію руху. Кутову відносну швидкість для цієї ситуації позначимо  $\omega_{otb}$ , з врахуванням того, що  $K_{vo} = K_{vy}$ ,  $K_{co} = K_{cy}$  та виразу (3.8) вона визначається наступним чином:

$$\omega_{otb} = \omega_{ot}(\omega_{vb}) = \frac{V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) \omega_{vb} - V_c \cos(K_{cy} + \omega_c t) \omega_c}{V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) + V_c \cos(K_{cy} + \omega_c t)} - \frac{[V_v \sin(K_{vy} + \omega_{vb}t) - V_c \sin(K_{cy} + \omega_c t)] V_v V_c \sin(\Delta K_y + \Delta \omega_b t) \Delta \omega_b}{[V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) + V_c \cos(K_{cy} + \omega_c t)] V_{ot}^2}, \quad (3.9)$$

де  $\Delta\omega_b = \omega_{vb} - \omega_c$  і  $\Delta K_y = K_{vy} - K_{cy}$ ;

$K_{vy}$  і  $K_{cy}$  – курси ухилення відповідно судна і цілі.

Спільне врахування як необхідного боку повороту, так і безпечної дистанції між судном та ціллю аналітично виражається істинністю наступних співвідношень:

$$G \in Mn_1, \text{ якщо } \left\{ K_{oty} \in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi] \text{ і } \omega_{otb} > 0 \right\}$$

$$\text{або } \left\{ K_{oty} \in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2,] \text{ і } \omega_{otb} < 0 \right\}; \text{ sign}(\omega_{vb}) = -\text{sign}(\Delta_y), \quad (3.10)$$

$$\text{де } K_{oty} = \arcsin \left[ \frac{(V_v \sin K_{vy} - V_c \sin K_{cy})}{V_{oty}} \right];$$

$$V_{oty} = \left[ V_v^2 + V_c^2 - 2 V_v V_c \cos(K_{vy} - K_{cy}) \right]^{1/2}.$$

Отримане співвідношення дозволяє зробити вибір безпечного маневру повернення на задану траєкторію. Якщо розглядати випадок, коли координація взаємодії судна та цілі під час виходу на програмні траєкторії відсутня, то керування процесом здійснюється лише судном з урахуванням прогнозу руху цілі. У цьому випадку керуюча дія являє собою кутову швидкість судна  $\omega_{vb}$ , яка має бути обрана таким чином, щоб задовольнялися вимоги умов (3.10) з урахуванням прогнозу кутової швидкості повороту цілі  $\omega_c$ .

Якщо під час розходження цілі не змінювала параметри руху і перебуває на програмній траєкторії руху, тобто  $\omega_c = 0$ , то кутова відносна швидкість  $\omega_{otb}$  на етапі виходу судна на програмну траєкторію руху залежить від кутової швидкості повороту судна  $\omega_{vb}$  і визначається наступним виразом:

$$\omega_{otb} = \frac{V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) \omega_{vb}}{V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) + V_c \cos(K_{cy})} -$$

$$- \frac{[V_v \sin(K_{vy} + \omega_{vb}t) - V_c \sin(K_{cy})] V_v V_c \sin(\Delta K_y + \omega_{vb}) \omega_{vb}}{[V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) + V_c \cos(K_{cy})] V_{ot}^2}. \quad (3.11)$$

Логіка вибору безпечного маневру повернення на програмну траєкторію руху полягає в наступному. Для повороту вибирається максимальне значення кутової швидкості повороту, та її знак визначається залежність від боку ухилення, тобто  $\omega_{vb} = -\text{sign}(\Delta_y)\omega_{V\max}$ . Потім залежно від того, чи ухилялася ціль під час розходження і з урахуванням прогнозованого значення та знаку її кутової швидкості повороту  $\omega_c$  за формулою (3.9) або (3.11) розраховується величина та знак відносної кутової швидкості  $\omega_{otb}$ .

З початкових параметрів руху судна і цілі, обчислюється початковий відносний курс  $K_{oty}$ , і за допомогою виразу (3.1) визначається, до якої підмножини належить реалізована ситуація  $G$ .

Якщо реалізована ситуація  $G$  належить підмножині  $Mn_1$ , то можливий безпечний маневр повернення судна на програмну траєкторію із кутовою швидкістю  $\omega_{vb} = -\text{sign}(\Delta_y)\omega_{V\max}$ .

У разі, якщо реалізована ситуація  $G$  не належить підмножині  $Mn_1$ , то слід перевірити можливість повороту в протилежний бік з кутовою швидкістю  $\omega_{vb} = \text{sign}(\Delta_y)\omega_{V\max}$  і через циркуляцію повернення судна на програмну траєкторію. У цьому випадку необхідний розрахунок величини і знаку відносної кутової швидкості  $\omega_{otb}$ , та перевірка нової ситуації на належність підмножині  $Mn_1$ . Якщо нова ситуація  $G$  відповідає підмножині  $Mn_1$ , то здійснюється повернення судна на програмну траєкторію шляхом виконання циркуляції.

Якщо для кутових швидкостей  $\omega_{vb} = -\text{sign}(\Delta_y)\omega_{V\max}$  і  $\omega_{vb} = \text{sign}(\Delta_y)\omega_{V\max}$  реалізується ситуація, що не належить підмножині  $Mn_1$ , але належить до підмножини  $Mn_3$ , для якого можливе збільшення дистанції  $L_t$ , так і її зменшення, слід уточнити тенденцію зміни дистанції  $L_t$ . Для цього слід розробити відповідну процедуру. Якщо виявиться, що дистанція скорочується, необхідно, як і для випадку  $G \in Mn_2$ , продовжити рух судна з постійними

параметрами, збільшуючи початкову дистанцію  $L_t > L_d$ , до моменту часу  $t_n$ , коли поворот судна, викликаючи скорочення дистанції  $L_t$ , забезпечує її мінімальне значення, що не перевищує величину  $L_d$ , тобто  $L_{t_{\min}} \geq L_d$  (рис. 3.5).

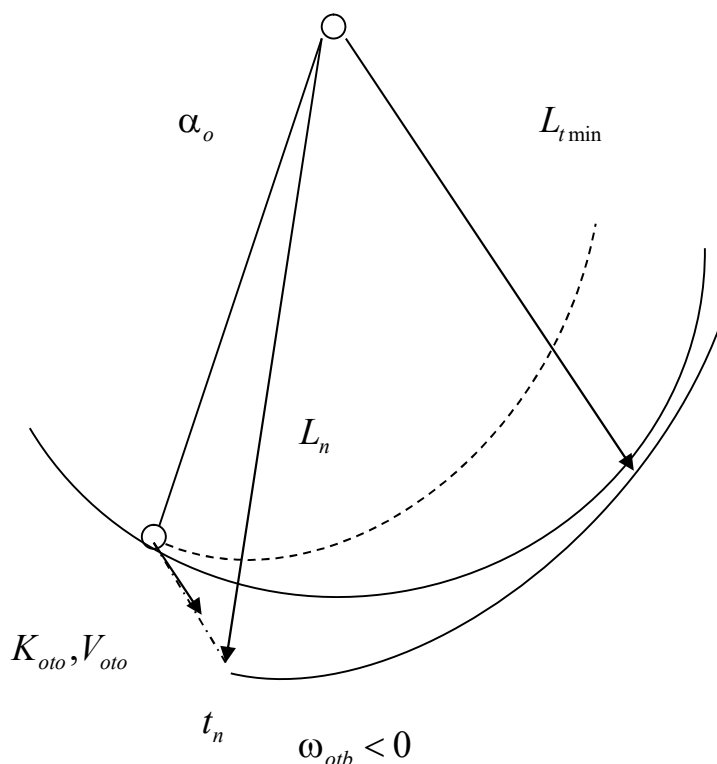


Рис. 3.5 – Маневр виходу зі збільшенням початкової дистанції

Розглянемо докладніше кожен із згаданих варіантів виконання маневру виходу на задану траєкторію руху з урахуванням розрахунку необхідних параметрів.

Вважатимемо, що реалізувалася ситуація підмножини  $Mn_1$ , і можливе виконання безпечного маневру виходу на програмну траєкторію руху поворотом судна в її бік. У цьому випадку безпечний маневр виходу є поворотом судна з курсу ухилення  $K_y$  на курс виходу  $K_b$ , а під час підходу до програмної траєкторії ще один поворот із курсу виходу  $K_b$  на програмний курс  $K_o$ , як показано на рис. 3.6 в істинному русі. Параметрами маневру виходу є курс виходу  $K_b$ , моменти часу початку  $t_{bn}$  і закінчення  $t_{bk}$  повороту з курсу  $K_y$

на курс  $K_b$ , а також моменти часу початку  $t_{kn}$  і закінчення  $t_{kk}$  повороту з курсу  $K_b$  на курс  $K_o$ . Маневр виходу на програмну траєкторію руху починається з часу  $t_{bn}$  за стартового курсу  $K_y$ .

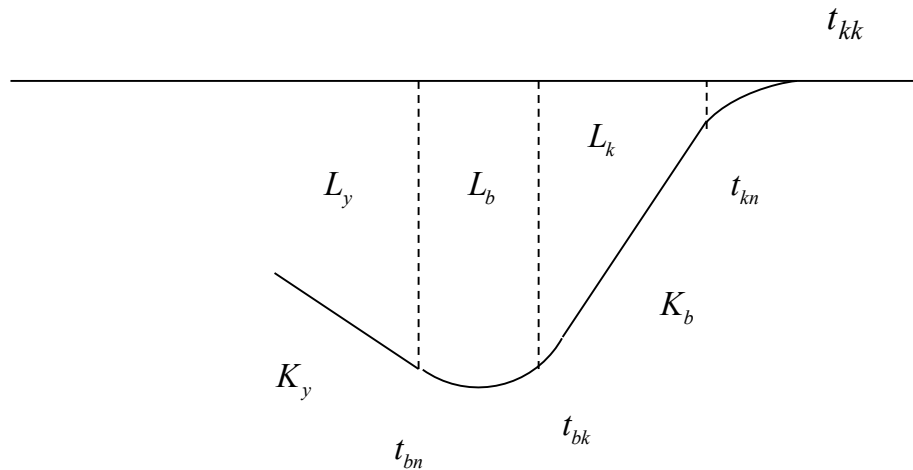


Рис. 3.6 – Структура маневру виходу судна на програмну траєкторію у разі  $G \in Mn_1$

Вибір курсу виходу на задану траєкторію  $K_b$  проводиться, виходячи з наступного міркування. Якщо курс ухилення  $K_y$  відрізняється від програмного  $K_o$  на величину  $\Delta K_y$ , тобто  $K_y = K_o + \Delta K_y$ , то курс  $K_b$  доцільно вибирати симетричним у зворотний бік, тобто  $K_b = K_o - \Delta K_y$ . Для розрахунку моментів часу початку та закінчення поворотів будемо використовувати найпростішу модель обертального руху судна (з постійною кутовою швидкістю  $\omega_{vb}$ ).

У загальному випадку вважатимемо, що для першого типу траєкторії, що розглядається має місце співвідношення  $t_{kn} \geq t_{bk}$ , тобто точки закінчення суміжних поворотів не збігаються ( $t_{kn} > t_{bk}$ ) за винятком граничного випадку, коли  $t_{kn} = t_{bk}$ . Такий граничний випадок характеризується граничною траєкторією, яка має дистанції  $L_y = L_b = L_k$  (рис. 3.6) і точки закінчення першого та початку другого поворотів збігаються. Згадана траєкторія показана на рис. 3.7.

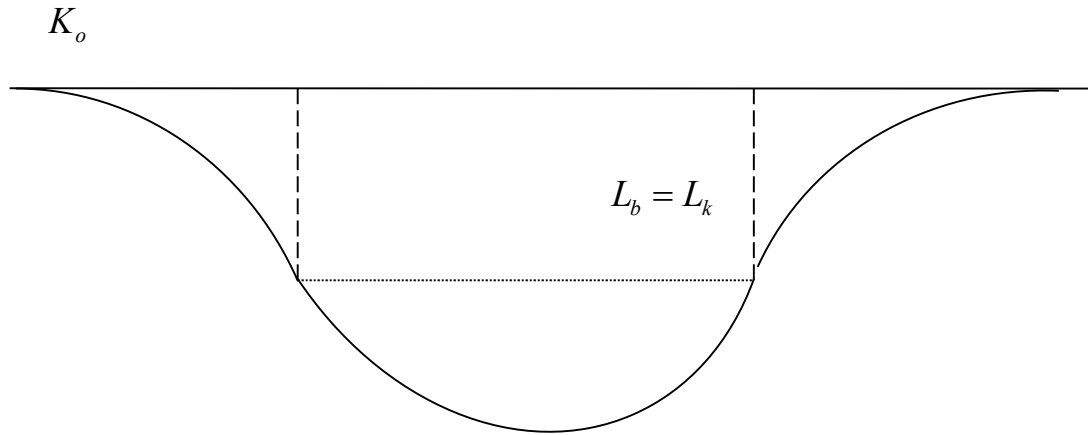


Рис. 3.7 – Гранична траєкторія процесу розходження

Оскільки  $K_y = K_o + \Delta K_y$  і  $K_b = K_o - \Delta K_y$ , то  $K_b = K_y - 2\Delta K_y$  і, отже, завжди дистанції  $L_y$  і  $L_b$  рівні поміж собою. Тому ознакою, що розрізняє граничну і звичайну траєкторії першого типу, є співвідношення між дистанціями  $L_y$  і  $L_k$ . За однакових кутових швидкостей поворотів не може виникати співвідношення  $L_y < L_k$ , за справедливості співвідношення  $L_y = L_k$  реалізується гранична траєкторія, а у разі  $L_y > L_k$  – звичайна траєкторія першого типу.

Дистанція  $L_y$  є вхідною змінною, і її величина може набувати різних значень. Величина дистанції  $L_k$  залежить від радіусу циркуляції  $R_c$  та співвідношення курсів  $K_b$  і  $K_o$ . Знайдемо цю залежність, звертаючись до рис. 3.8.

З рис. 3.8 випливає, що вираз має такий вигляд:

$$L_k = R_c (1 - \cos \Delta K_y).$$

За спрощеної моделі обертального руху судна, як показано в роботі [26] тривалості поворотів  $\tau$  залежать від збільшення курсу  $\Delta K$  та кутової швидкості

судна  $\omega_V$  наступним чином:

$$\tau = \Delta K / \omega_V.$$

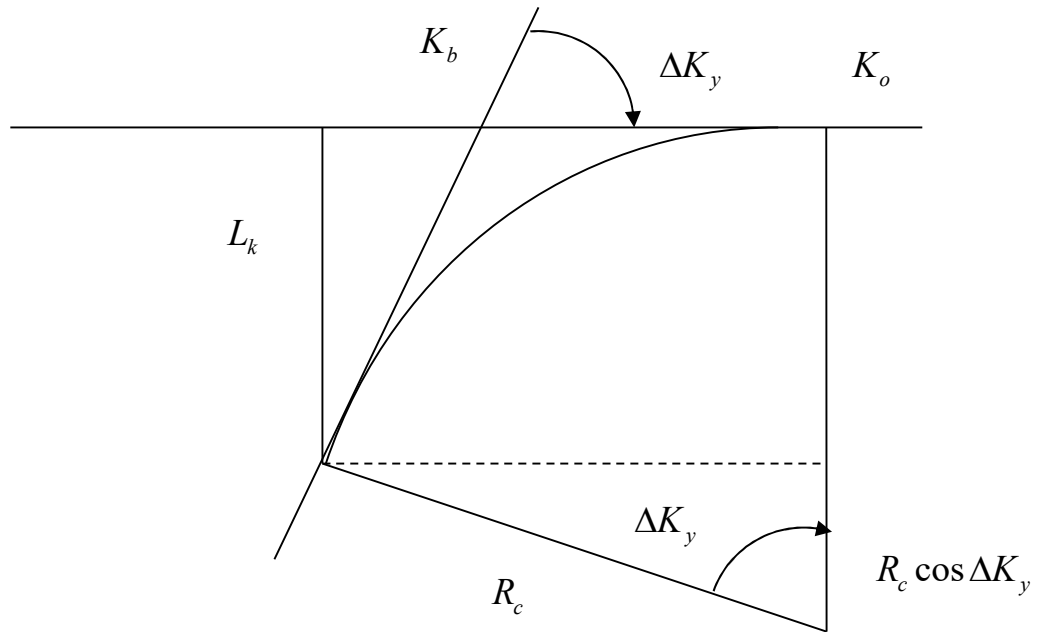


Рис. 3.8 – До виведення аналітичного виразу для  $L_k$

Тому при заданому моменті часу початку повороту на програмну траєкторію руху  $t_{bn}$  тривалість повороту  $\Delta t_{bn}$  розраховується за формулою:

$$\Delta t_{bn} = 2\Delta K_y / \omega_V,$$

а момент закінчення повороту  $t_{bk} = t_{bn} + \Delta t_{bn}$ .

Момент часу початку повороту на програмну траєкторію  $t_{kn}$  визначається, з наступних міркувань. Якщо реалізувалася гранична траєкторія, то, очевидно,  $t_{kn} = t_{bk}$ , якщо траєкторія звичайна, необхідно визначити тривалість слідування судна курсом повернення  $K_b$ . Для цього скористаємось рис. 3.9.

З рисунка випливає, що величина  $S_b$  визначається за допомогою формули:

$$S_b = \frac{(L_y - L_k)}{\sin \Delta K_y},$$

а шуканий момент часу  $t_{kn}$  розраховується з виразу:

$$t_{kn} = t_{bk} + \frac{(L_y - L_k)}{V_v \sin \Delta K_y}.$$

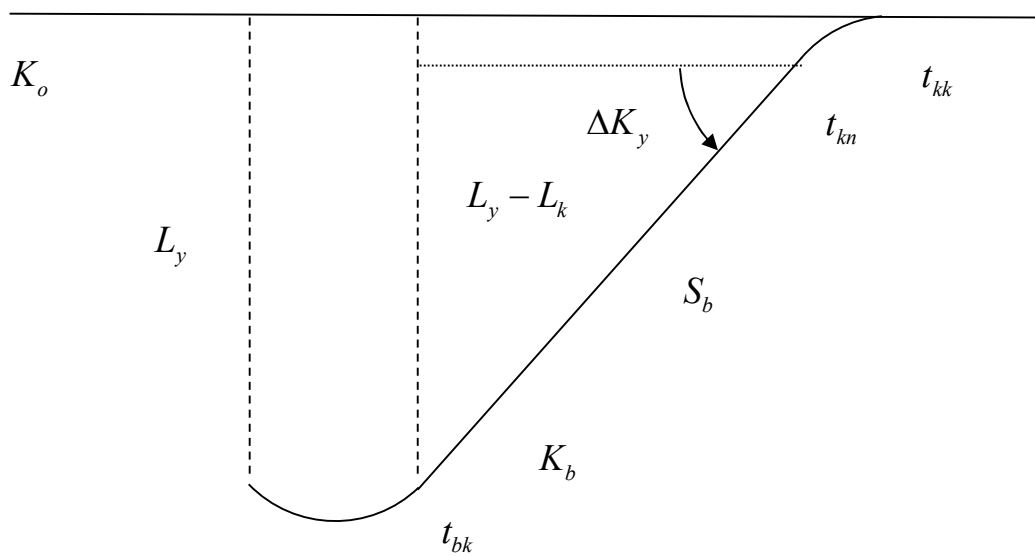


Рис. 3.9 – Розрахунок моменту часу  $t_{kn}$

І, нарешті, момент виходу судна на програмну траєкторію  $t_{kk}$  розраховується за формулою:

$$t_{kk} = t_{kn} + \Delta K_y / \omega_v.$$

Розглянемо випадок, коли початкова ситуація  $G$  належить підмножині  $Mn_3$ , тобто  $G \in Mn_3$ , та необхідно виявити, як змінюється дистанція  $L$  між судном і ціллю. Тенденцію зміни дистанції  $L$  можна виявити, з наступного рис. 3.10.

Як впливає з рисунка, за одиницю часу дистанція змінюється від значення  $L_{i-1}$  до  $L_i$ , причому справедливий вираз:

$$L_i = \left[ L_{i-1}^2 + V_{ot}^2 - 2L_{i-1}V_{ot} \cos(K_{ot} - dK_{ot} - \alpha) \right]^{1/2}.$$

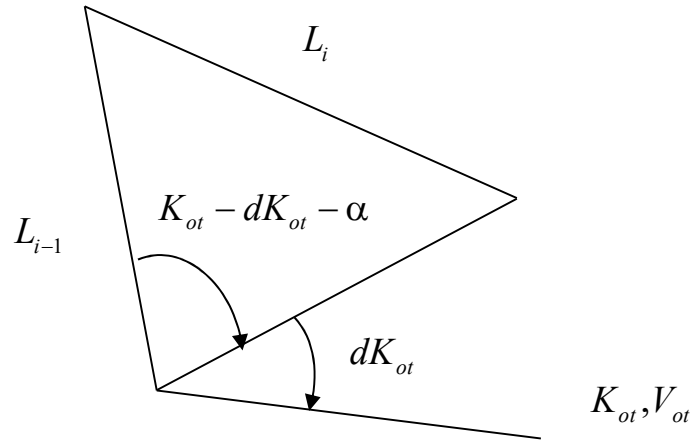


Рис. 3.10 – Визначення тенденції зміни дистанції  $L$

Якщо врахувати, що за одиницю часу  $dK_{ot} = \omega_{otb}$ , то за нерівності

$$\left[ V_{ot}^2 - 2L_{i-1}V_{ot} \cos(K_{ot} - \omega_{otb} - \alpha) \right] \geq 0 \quad (3.12)$$

має місце співвідношення  $L_i \geq L_{i-1}$ , тобто дистанція  $L$  не зменшуватиметься.

З нерівності (4.13) впливає співвідношення:

$$V_{ot}^2 \geq 2L_{i-1}V_{ot} \cos(K_{ot} - \omega_{otb} - \alpha),$$

або

$$\cos(K_{ot} - \omega_{otb} - \alpha) \leq \frac{V_{ot}}{2L_{i-1}}.$$

З останнього виразу отримаємо:

$$K_{ot} - \omega_{otb} - \alpha \geq \arccos\left(\frac{V_{ot}}{2L_{i-1}}\right),,$$

або остаточно

$$\omega_{otb} \leq K_{ot} - \alpha - \arccos\left(\frac{V_{ot}}{2L_{i-1}}\right)..$$

Врахуємо, що кожному моменту часу відповідають різні значення відносних швидкості та курсу, пеленгу та відносної кутової швидкості, тому останній вираз набуває остаточного вигляду:

$$\omega_{otbi} \leq K_{oti} - \alpha_i - \arccos\left(\frac{V_{oti}}{2L_{i-1}}\right). \quad (3.13)$$

Якщо нерівність (3.13) є справедливою для всіх моментів часу криволінійного руху, то судно може безпечно повернутися на програмну траєкторію руху. Величина відносної кутової швидкості  $\omega_{otb}$  розраховується за формулами (3.9) або (3.11).

Розглянемо випадок, коли перевіряється можливість повороту судна у протилежний бік із кутовою швидкістю  $\omega_{vb} = \text{sign}(\Delta_y) \omega_{V_{\max}}$  та за допомогою циркуляції повернення судна на програмну траєкторію. Якщо внаслідок такого повороту зміниться знак відносної кутової швидкості  $\omega_{otb}$ , то реалізується ситуація, що належить підмножині  $Mn_3$ .

Якщо під час перевірки за допомогою виразу (3.13) виявиться, що можливий безпечний маневр розходження, його реалізація можлива наступним чином (рис. 3.11).

В даному випадку тривалість повороту  $\Delta t_{bn}$  на курс виходу  $K_b$ , як впливає з наведеного рисунку, дорівнює:

$$\Delta t_{bn} = 2(\pi - \Delta K_y) / \omega_V,$$

а момент закінчення повороту  $t_{bk} = t_{bn} + 2(\pi - \Delta K_y) / \omega_V$ .

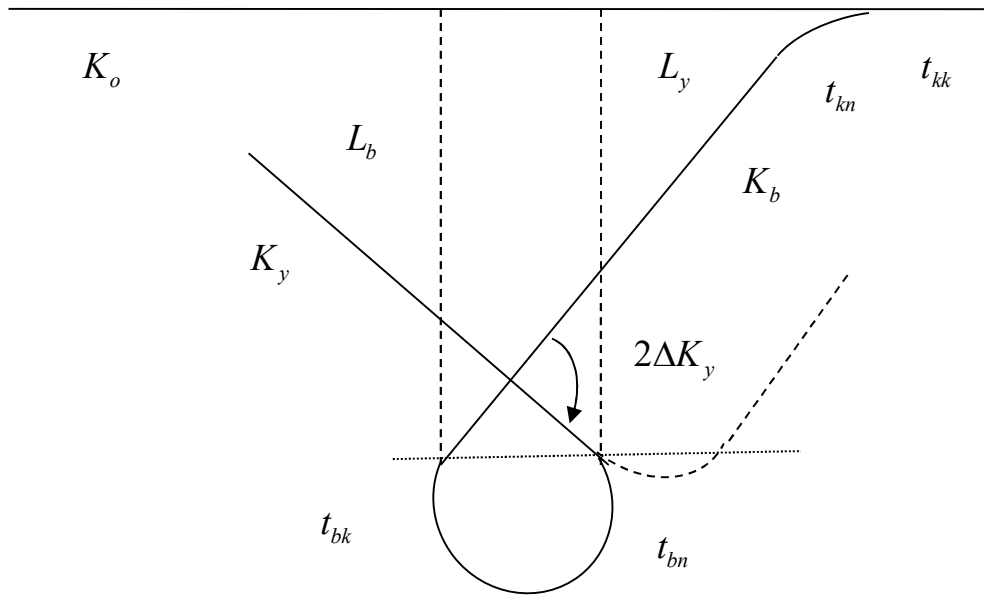


Рис. 3.11 – Маневрування за допомогою циркуляції

Як і в попередньому випадку, моменти часу  $t_{kn}$  і  $t_{kk}$  обчислюються за такими формулами:

$$t_{kn} = t_{bk} + \frac{(L_y - L_k)}{V_v \sin \Delta K_y}, \quad t_{kk} = t_{kn} + \Delta K_y / \omega_V.$$

У разі коли між курсами ухилення  $K_y$  і повернення на програмну траєкторію  $K_b$  немає симетричної залежності, тобто  $K_b = K_o - \gamma$  під час ухилення судна вправо, причому  $\gamma = 30 \div 40^\circ$ , розрахунок параметрів маневру виходу розраховується наступним чином (рис. 3.12).



Для визначення координат  $X_{vp}$  і  $Y_{vp}$  кінця відрізка  $L_b$  використовуємо рівняння лінії, що проходить через точки  $(X_{vp}, Y_{vp})$  і  $(X_{vo}, Y_{vo})$ , а також перпендикулярної лінії, що проходить через точку  $(X_{vk}, Y_{vk})$ :

$$(Y_{vp} - Y_{vo}) \sin K_o = (X_{vp} - X_{vo}) \cos K_o, \quad (Y_{vp} - Y_{vk}) = (X_{vp} - X_{vk}) \operatorname{tg} K_o. \quad (3.14)$$

З першого рівняння отримаємо вираз для  $Y_{vp}$ :

$$Y_{vp} \sin K_o = Y_{vo} \sin K_o + (X_{vp} - X_{vo}) \cos K_o,$$

або

$$Y_{vp} = \left[ Y_{vo} \sin K_o + (X_{vp} - X_{vo}) \cos K_o \right] / \sin K_o.$$

Отриманий вираз для  $Y_{vp}$  підставимо до другого рівняння (3.14):

$$\left[ Y_{vo} \sin K_o + (X_{vp} - X_{vo}) \cos K_o \right] / \sin K_o - Y_{vk} = X_{vp} \operatorname{tg} K_o - X_{vk} \operatorname{tg} K_o,$$

звідки випливає вираз:

$$X_{vp} \operatorname{ctg} K_o - X_{vp} \operatorname{tg} K_o = X_{vo} \operatorname{ctg} K_o + Y_{vk} - Y_{vo},$$

або

$$X_{vp} (\operatorname{ctg} K_o - \operatorname{tg} K_o) = X_{vo} \operatorname{ctg} K_o + Y_{vk} - Y_{vo},$$

звідки:

$$X_{vp} = (X_{vo} \operatorname{ctg} K_o + Y_{vk} - Y_{vo}) / (\operatorname{ctg} K_o - \operatorname{tg} K_o).$$

Після перетворень отримаємо остаточно вираз для  $X_{vp}$ :

$$X_{vp} = \cos K_o \left[ X_{vo} \cos K_o + (Y_{vk} - Y_{vo}) \sin K_o \right] / (\cos^2 K_o - \sin^2 K_o) ..$$

Дистанція  $L_b$  визначається з формули:

$$L_b = \sqrt{(X_{vp} - X_{vk})^2 + (Y_{vp} - Y_{vk})^2}.$$

Розрахунок параметрів маневру здійснюється за формулами:

$$t_{bk} = t_{bn} + \left[ 2\pi - (K_y - K_b) \right] / \omega_V, \quad t_{kn} = t_{bk} + \frac{(L_b - L_k)}{V_v \sin \Delta K_y}, \quad t_{kk} = t_{kn} + (K_b - K_o) / \omega_V.$$

Розглянемо випадок, коли необхідно продовжити рух судна з постійними параметрами, збільшуючи початкову дистанцію  $L_t > L_d$ , до моменту часу  $t_n$ , коли поворот судна, викликаючи скорочення дистанції  $L_t$ , забезпечує її мінімальне значення (третій тип траєкторії), що не перевищує величину  $L_d$ . Для цього розглянемо рис. 3.13.

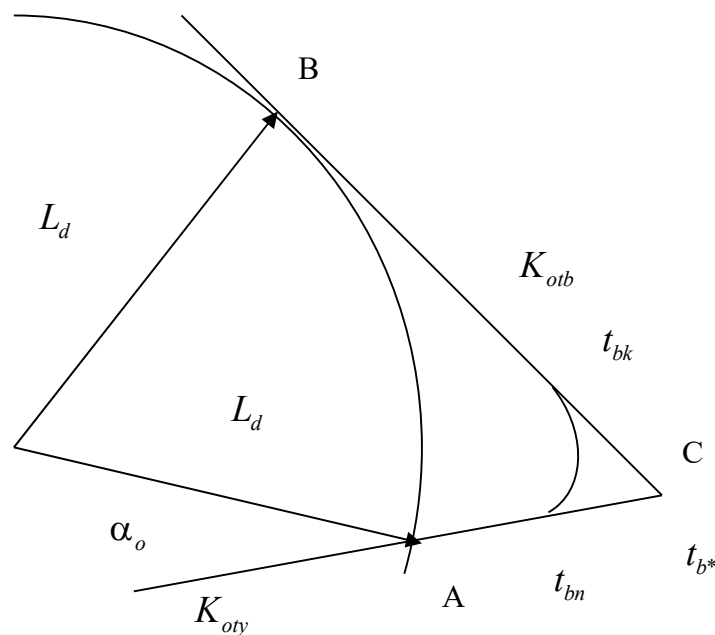


Рис. 3.13 – Розрахунок часових параметрів під час реалізації траєкторії третього типу

Для розрахунку моментів часу  $t_{bn}$  і  $t_{bk}$  необхідно знайти момент часу  $t_{b*}$ , відповідний перетину ліній відносного руху для курсів ухилення  $K_{oty}$  та повернення на програмну траєкторію  $K_{otb}$  (точка  $C$ ).

Запишемо рівняння для прямих, що проходять через точки  $A$ ,  $C$  і  $B$ ,  $C$ , з яких можна знайти координати точки перетину  $C$  і час  $t_{b*}$ .

Рівняння прямої, що проходить через точки  $A$  і  $C$ , має наступний вид:

$$(X_C - X_A) \cos K_{oty} = (Y_C - Y_A) \sin K_{oty}, \quad (3.15)$$

де  $X_A$ ,  $Y_A$ ,  $X_C$  і  $Y_C$  – координати відповідно до точок  $A$  і  $C$  у системі координат з центром, що збігається з ціллю.

Прямій, що проходить через точки  $B$  і  $C$ , відповідає наступне рівняння:

$$(X_C - X_B) \cos K_{otb} = (Y_C - Y_B) \sin K_{otb}, \quad (3.16)$$

де  $X_B$  і  $Y_B$  – координати точки  $B$ .

Вирішуючи спільно рівняння (3.15) та (3.16) відносно змінних  $X_C$  і  $Y_C$ , отримаємо:

$$Y_C = \frac{G}{(\operatorname{tg} K_{oty} - \operatorname{tg} K_{otb})}, \quad X_C = X_B + \left[ \frac{G}{(\operatorname{tg} K_{oty} - \operatorname{tg} K_{otb})} - Y_B \right] \operatorname{tg} K_{otb},$$

де  $G = X_B - X_A + Y_A \operatorname{tg} K_{oty} - Y_B \operatorname{tg} K_{otb}$ .

Координати точок  $A$  і  $B$  визначаються за допомогою аналітичних виразів, що наведені на рис. 3.13:

$$X_A = L_d \sin \alpha_o, \quad Y_A = L_d \cos \alpha_o.$$

$$X_B = L_d \sin \left( K_{otb} + \frac{\pi}{2} \right), \quad Y_B = L_d \cos \left( K_{otb} + \frac{\pi}{2} \right),$$

або

$$X_B = L_d \cos K_{otb}, \quad Y_B = -L_d \sin K_{otb}.$$

Відстань  $L_{AC}$  між точками  $A$  і  $C$ , що визначає момент часу  $t_{b*}$ , знаходиться з виразу:

$$L_{AC} = \sqrt{(X_C - X_A)^2 + (Y_C - Y_A)^2}.$$

У свою чергу, момент часу  $t_{b*}$  визначається наступною формулою:

$$t_{b*} = \frac{L_{AC}}{V_{oty}} = \frac{\sqrt{(X_C - X_A)^2 + (Y_C - Y_A)^2}}{V_{oty}}.$$

Для розрахунку моменту часу початку повороту до програмної траєкторії  $t_{bn}$  необхідно врахувати поправку на інерційність судна  $\Delta t_b$  на момент часу  $t_{b*}$ , тобто  $t_{bn} = t_{b*} - \Delta t_b$ , причому, як показано у роботі [26], поправка  $\Delta t_b$  обчислюється для прийнятої моделі обертального руху за формулою:

$$\Delta t_b = \left\{ \sin K_{otb} R_c (\sin K_b - \sin K_y) - \cos K_{otb} R_c (\cos K_y - \cos K_b) + \rightarrow \right. \\ \left. V_c \tau \sin(K_{otb} - K_c) \right\} / \left[ V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb}) \right],$$

де  $\tau$  – тривалість повороту.

Очевидно, що справедливі аналітичні залежності:

$$\tau = \frac{Abs(K_b - K_y)}{\omega_{yb}} \quad \text{і} \quad t_{bk} = t_{bn} + \tau.$$

Для отриманих у цьому підрозділі результатів характерна відсутність координації суден під час повернення на програмну траєкторію, тобто тип

траєкторії повернення на програмну траєкторію реалізується залежно від початкових умов та довільної поведінки цілі.

### 3.2. Координація суден під час їхнього повернення на програмні траєкторії руху

Розглянемо принцип координації суден під час вибору ними безпечних маневрів повернення програмні траєкторії руху. У загальному випадку кожне з суден під час маневру може вибрати один із трьох варіантів: повороту вправо, повороту вліво або продовжити слідувати незмінним курсом. Для судна такі маневри позначимо відповідно  $G_+^{(v)}$ ,  $G_-^{(v)}$  і  $G_o^{(v)}$ , а для цілі  $G_+^{(c)}$ ,  $G_-^{(c)}$  і  $G_o^{(c)}$ . Координація передбачає вибір парного маневру для судна та цілі залежно від початкової ситуації, що забезпечує їхнє безпечне повернення на програмні траєкторії. За таких умов суттєвою є зміна відносного курсу  $K_{ot}$  від зміни курсів судна і цілі  $K_v$  і  $K_c$ .

Знайдемо таку залежність, виходячи з того, що в роботі [26] наведено вираз відносного курсу  $K_{ot}$  у функції курсів  $K_v$ ,  $K_c$  і швидкостей  $V_v$ ,  $V_c$  судна та цілі, яке має наступний вигляд:

$$K_{ot} = \arcsin \left[ \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)}{V_{ot}} \right].$$

Для отримання необхідної залежності необхідно цей вираз спочатку продиференціювати за курсом судна  $K_v$ , а потім отриманий результат – за курсом цілі  $K_c$ .

Похідна вихідного виразу за курсом  $K_v$ :

$$\frac{dK_{ot}}{dK_v} = \left\{ 1 - \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_c)^2}{V_{ot}^2} \right\}^{-1/2} \cdot \frac{d}{dK_v} \left[ \frac{(V_v \sin K_v - V_c \sin K_v)}{V_{ot}} \right] \quad (3.17)$$

після перетворень співвідношення (3.17) виражається так:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_v} = \frac{V_v (V_v - V_c \cos \Delta K)}{V_v^2 + V_c^2 - 2 V_v V_c \cos \Delta K},$$

де  $\Delta K = K_v - K_c$ .

Розділимо чисельник і знаменник виразу на  $V_v^2$ :

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_v} = \frac{1 - \rho \cos \Delta K}{1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K}, \quad (3.18)$$

де  $\rho = \frac{V_c}{V_v}$ , причому  $V_v > V_c$  і  $\rho < 1$ .

Для пошуку залежності зміни величини відносного курсу  $K_{ot}$  від одночасної зміни курсів обох суден  $K_v$  і  $K_c$  необхідно вираз (3.18) продиференціювати за змінною  $K_c$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} = & \frac{\frac{\partial}{\partial K_c} (1 - \rho \cos \Delta K) (1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K)}{(1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K)^2} - \\ & - \frac{(1 - \rho \cos \Delta K) \frac{\partial}{\partial K_c} (1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K)}{(1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K)^2}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Знаходимо необхідні похідні:

$$\frac{\partial}{\partial K_c}(1 - \rho \cos \Delta K) = -\rho \sin \Delta K, \quad \frac{\partial}{\partial K_c}(1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K) = -2\rho \sin \Delta K.$$

Підставляємо отримані вирази у формулу (3.19) та отримаємо:

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} = \frac{(-\rho \sin \Delta K)(1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K) - (1 - \rho \cos \Delta K)(-2\rho \sin \Delta K)}{(1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K)^2}.$$

Перетворимо отриманий вираз:

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} = \frac{(-\rho \sin \Delta K)[(1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K) - 2(1 - \rho \cos \Delta K)]}{(1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K)^2}.$$

Остаточно отримаємо шуканий вираз:

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} = \rho \sin \Delta K \left[ \frac{2(1 - \rho \cos \Delta K) - (1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K)}{(1 + \rho^2 - 2 \rho \cos \Delta K)^2} \right]. \quad (3.20)$$

На рис. 3.14 показано залежність зміни відносного курсу  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_1 \partial K_2}$ , яка на рисунку позначена  $dK_{ot}$ , від різниці курсів суден  $\Delta K$ , позначеної на рисунку  $dK$ .

Парні маневри судна і цілі становлять набір із восьми можливих варіантів (виключаючи варіант сталості курсів судна і цілі):

$$M_{o,+} = (G_o^{(v)}, G_+^{(c)}), \quad M_{o,-} = (G_o^{(v)}, G_-^{(c)}), \quad M_{+,o} = (G_+^{(v)}, G_o^{(c)}), \quad M_{-,o} = (G_-^{(v)}, G_o^{(c)}), \\ M_{+,+} = (G_+^{(v)}, G_+^{(c)}), \quad M_{+,-} = (G_+^{(v)}, G_-^{(c)}), \quad M_{-,+} = (G_-^{(v)}, G_+^{(c)}), \quad M_{-,-} = (G_-^{(v)}, G_-^{(c)}).$$

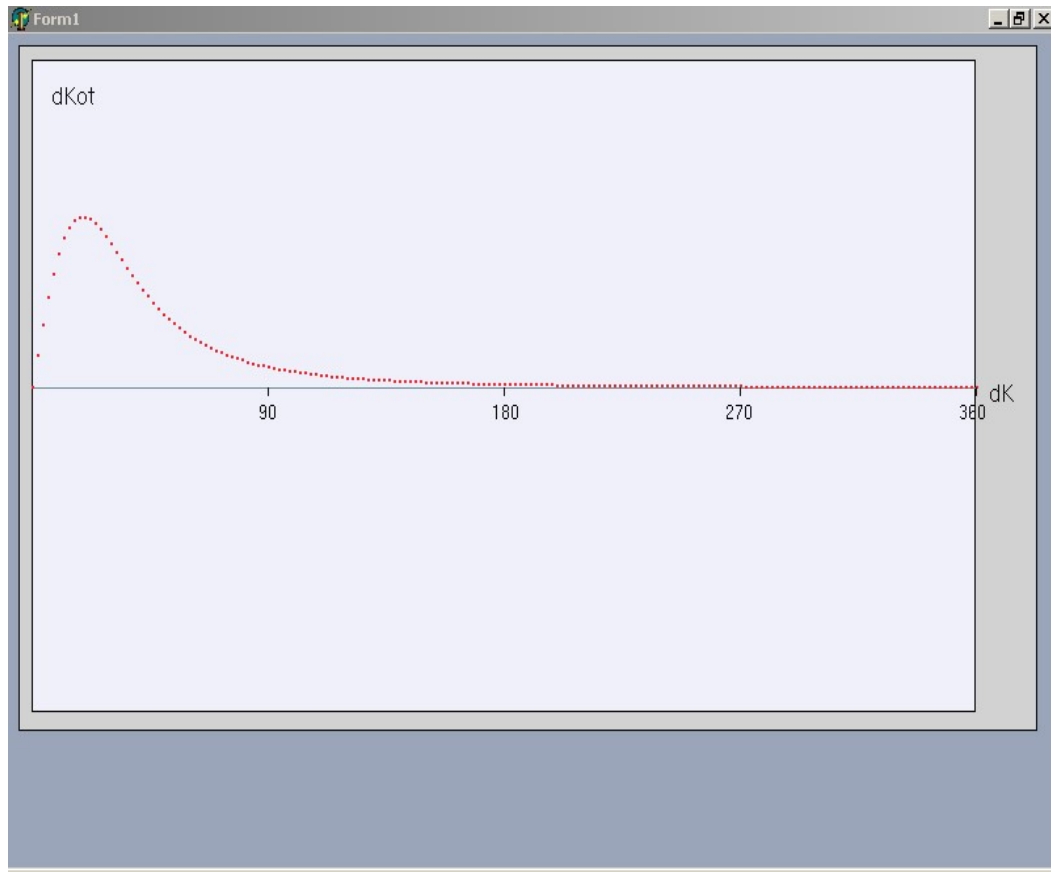


Рис. 3.14 – Залежність відносного курсу dKot від різниці курсів суден dK

Перелічені парні маневри судна та цілі вибираються в початковий момент часу ( $t = 0$ ), тому вираз для відносної кутової швидкості  $\omega_{otb}$  на початку маневру виходу визначається виразом:

$$\omega_{ot}(t=0) = \frac{V_v \cos(K_{vy}) \omega_{vb} - V_c \cos(K_{cy}) \omega_c}{V_v \cos(K_{vy}) + V_c \cos(K_{cy})} - \frac{[V_v \sin(K_{vy}) - V_c \sin(K_{cy})] V_v V_c \sin(\Delta K_y) \Delta \omega_b}{[V_v \cos(K_{vy}) + V_c \cos(K_{cy})] V_{ot}^2}. \quad (3.21)$$

Аналіз отриманих виразів (3.20) та (3.21) дозволяє оцінити доцільність застосування тих чи інших парних маневрів у різних початкових ситуаціях. Для визначеності вважатимемо, що швидкість судна перевищує швидкість цілі, тобто  $V_v > V_c$ .

В результаті аналізу отримано такі результати. Якщо реалізується парний маневр  $M_{o,+} = (G_o^{(v)}, G_+^{(c)})$ , під час якого  $\frac{\partial K_v}{\partial t} = 0$  і  $\frac{\partial K_c}{\partial t} > 0$ , то у випадку  $K_c \in [K_{c \min}, K_{c \max}]$  має місце співвідношення  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} > 0$ , якщо ж  $K_c \in [K_{c \max}, K_{c \min}]$ , то  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} < 0$ . Причому значення  $K_{c \max}$  і  $K_{c \min}$  розраховуються за формулами  $K_{c \min} = K_l + \arccos(p)$  і  $K_{c \max} = K_l - \arccos(p)$ .

Під час парного маневру  $M_{o,-} = (G_o^{(v)}, G_-^{(c)})$ , коли  $\frac{\partial K_v}{\partial t} = 0$  і  $\frac{\partial K_c}{\partial t} < 0$ , в разі  $K_c \in [K_{c \min}, K_{c \max}]$  справедлива нерівність  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} < 0$ , якщо ж  $K_c \in [K_{c \max}, K_{c \min}]$ , то  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} > 0$ .

У разі парного маневру  $M_{+,o} = (G_+^{(v)}, G_o^{(c)})$  ( $\frac{\partial K_v}{\partial t} > 0$  і  $\frac{\partial K_c}{\partial t} = 0$ ) справедливо  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_v} > 0$ , а парний маневр  $M_{-,o} = (G_-^{(v)}, G_o^{(c)})$ , під час якого  $\frac{\partial K_v}{\partial t} < 0$  и  $\frac{\partial K_c}{\partial t} = 0$  характеризується нерівністю  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_v} < 0$ .

Для парних маневрів, коли курс змінюють обидва судна, справедливі наступні співвідношення.

Парний маневр  $M_{+,+} = (G_+^{(v)}, G_+^{(c)})$ , коли  $\frac{\partial K_v}{\partial t} > 0$  і  $\frac{\partial K_c}{\partial t} > 0$ , незалежно від різниці курсів  $\Delta K$  характеризується нерівністю  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} > 0$ .

Для парного маневру  $M_{+,-} = (G_+^{(v)}, G_-^{(c)})$  ( $\frac{\partial K_v}{\partial t} > 0$  і  $\frac{\partial K_c}{\partial t} < 0$ ) за різниці курсів 180 і 270 градусів величина  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} \approx 0$ , а коли різниця курсів дорівнює 0 і 90 градусів  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} > 0$ , причому максимальне значення припадає за  $\Delta K = 0$ .

Парний маневр  $M_{-,+} = (G_-^{(v)}, G_+^{(c)})$ , для якого  $\frac{\partial K_v}{\partial t} < 0$  і  $\frac{\partial K_c}{\partial t} > 0$ , зміна відносного курсу також залежить від різниці курсів  $\Delta K$ . Так, за  $\Delta K = 180$  і  $\Delta K = 90$  справедливо  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} \approx 0$ , а у випадку  $\Delta K = 0$  і  $\Delta K = 270$  має місце  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} < 0$ , причому найбільша зміна за  $\Delta K = 0$ .

Заклучний парний маневр  $M_{-,-} = (G_-^{(v)}, G_-^{(c)})$ , або  $\frac{\partial K_v}{\partial t} < 0$  і  $\frac{\partial K_c}{\partial t} < 0$ , незалежно від значення  $\Delta K$  характеризується нерівністю  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} < 0$ .

Під час вибору парного маневру для конкретної ситуації необхідно враховувати сторону повороту, необхідну для виходу на програмну траєкторію руху. Параметр, що характеризує необхідну сторону повороту, позначимо через  $q$ , причому повороту вправо відповідає  $q = 1$ , а повороту вліво  $q = -1$ . Необхідний бік повороту для судна визначається за допомогою виразу  $q_v = -\text{sign}(\Delta_{yv})$ , а для цілі  $q_c = -\text{sign}(\Delta_{yc})$ .

Розглянемо вибір парного маневру виходу на програмну траєкторію руху за різних початкових ситуацій, причому початкову ситуацію характеризують такі параметри: різниця курсів  $\Delta K$ , необхідні боки найкоротшого повороту  $q_v$ ,  $q_c$ , знак кутової швидкості відносного обертання  $\omega_{otb}$ , а також значення відносного початкового курсу  $K_{oto}$  і пеленг із судна на ціль  $\alpha_o$ . Для кожної початкової ситуації виберемо найбільш підходящий парний маневр з урахуванням типу траєкторій повернення програмну траєкторію руху.

У випадку, коли ухилення з програмною траєкторією виконували обидва судна, причому  $q_v = 1$  і  $q_c = -1$ , різниця курсів  $\Delta K$  дорівнює від  $0$  до  $90^\circ$ , різниця початкового пеленгу та відносного курсу  $\gamma = K_{oto} - \alpha_o \in [90, 180]$ , безпечне розходження можливе за зміни відносного курсу до збільшення, тобто

$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} > 0$ . Це можливо під час використання парного маневру  $M_{+,-}$ , причому кожне з суден виконує маневр виходу, використовуючи перший тип траєкторії повернення (у бік програмної траєкторії).

Якщо ж вихідна ситуація відрізняється від попередньої лише іншим значенням  $\gamma \notin [90, 180]$ , то вибирається парний маневр  $M_{+,+}$ , для якого  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} > 0$  незалежно від значення різниці курсів  $\Delta K$ , однак ціль виконує циркуляцію, використовуючи другий тип траєкторії повернення.

Якщо ж ухилення з програмної траєкторії виконували обидва судна, а для повернення необхідні  $q_v = -1$  і  $q_c = 1$  за різниці курсів  $\Delta K$ , що дорівнює від  $270$  до  $0^\circ$ , різниця початкового пеленгу та відносного курсу  $\gamma \in [180, 270]$ , безпечне розходження можливе за зміни відносного курсу до зменшення, тобто  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} < 0$ . Це можливо під час використання парного маневру  $M_{-,+}$ , причому кожне з суден виконує маневр виходу, використовуючи перший тип траєкторії повернення (у бік програмної траєкторії).

Якщо величина  $\gamma$  приймає інші значення, то вибирається парний маневр  $M_{-,-}$ , під час якого  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} < 0$  та судно, здійснюючи циркуляцію, реалізує другий тип траєкторії повернення.

У ситуації, коли для повернення необхідні  $q_v = 1$  і  $q_c = 1$  за довільної різниці курсів  $\Delta K$  і різниця початкового пеленгу та відносного курсу  $\gamma \in [90, 270]$ , безпечне розходження можливе зі збільшенням відносного курсу, тобто  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} > 0$ , що можливе під час використання парного маневру  $M_{+,+}$ , причому кожне з суден виконує маневр виходу, використовуючи перший тип траєкторії повернення.

За такої ж початкової ситуації можливе застосування парного маневру.

$M_{+,-}$ , причому ціль виконує відхилення через зменшення курсу, здійснюючи циркуляцію, тобто використовуючи другий тип траєкторії повернення.

Якщо реалізується ситуація, коли для повернення необхідні  $q_v = -1$  і  $q_c = -1$ , різниця курсів  $\Delta K$  довільна і різниця початкового пеленгу та відносного курсу  $\gamma \in [90, 270]$ , безпечне розходження можливе в разі зменшення відносного курсу, тобто  $\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_v \partial K_c} < 0$ , що можливо під час використання парного маневру  $M_{-,-}$ , причому кожне з суден виконує маневр виходу, використовуючи перший тип траєкторії повернення.

За такої ж початкової ситуації можливе застосування парного маневру  $M_{-,+}$ , причому ціль виконує відхилення через збільшення курсу, здійснюючи циркуляцію, тобто використовуючи другий тип траєкторії повернення.

У ситуаціях, коли одне з суден не виконувало ухилення із заданої траєкторії, можливі наступні варіанти траєкторії повернення. Перші дві ситуації характерні відсутністю ухилення судна, а ухилення виконувала тільки ціль. Якщо значення  $q_v = 0$  і  $q_c = 1$ , незалежно від значення  $\Delta K$  за  $V_v > V_c$  і курсі цілі  $K_c \in [K_{c \min}, K_{c \max}]$ , а також  $\gamma \in [90, 180]$ , безпечний маневр повернення можливий, коли  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} > 0$ , тобто під час парного маневру  $M_{o,+}$ . За тієї ж початкової ситуації, якщо  $V_v \leq V_c$ , то парний маневр  $M_{o,+}$  є доцільним за будь-яких значень  $K_c$ .

За значень  $q_v = 0$  і  $q_c = 1$ , будь-яких значеннях  $\Delta K$  за  $V_v > V_c$  і курсі цілі  $K_c \in [K_{c \max}, K_{c \min}]$ , у разі  $\gamma \in [180, 270]$ , безпечний маневр повернення можливий, коли  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} < 0$ , що має місце під час парного маневру  $M_{o,+}$ .

У випадку, коли  $q_v = 0$  і  $q_c = -1$ , незалежно від значення  $\Delta K$  за  $V_v > V_c$  і  $K_c \in [K_{c \min}, K_{c \max}]$ , а також  $\gamma \in [180, 270]$  для безпечного маневру необхідно

$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} < 0$ , що забезпечує парний маневр  $M_{o,-}$ . Цей маневр є доцільним і за  $V_v \leq V_c$ .

За тієї ж початкової ситуації, але з умовою  $K_c \in [K_{c \max}, K_{c \min}]$  і  $\gamma \in [90, 180]$  безпека маневру виходу гарантується співвідношенням  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_c} > 0$ , тобто парним маневром  $M_{o,-}$ .

У випадку, коли ухилення з програмної траєкторії руху виконувало лише судно, тобто  $q_v = \pm 1$  і  $q_c = 0$ , доцільним є використання парних маневрів  $M_{+,o}$  і  $M_{-,o}$ . Умови застосування зазначених парних маневрів аналогічні умовам під час маневрування цілі.

Перелік початкових ситуацій  $G_i$  та відповідні їм парні маневри  $M_{i,j}$  безпечного виходу судна та цілі на програмні траєкторії наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Відповідність парних маневрів  $M_{i,j}$  початковим ситуаціям  $G_i$

$G_i$	$q_v$	$q_c$	$\Delta K$	$\gamma$	$M_{i,j}$	$Tr_v$	$Tr_c$	Прим.
$G_1$	1	-1	$\Delta K \in [0, 90]$	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{+,-}$	1 тип	1 тип	
$G_2$	1	-1	—	$\gamma \notin [90, 180]$	$M_{+,+}$	1 тип	2 тип	
$G_3$	-1	1	$\Delta K \in [270, 360]$	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{-,+}$	1 тип	1 тип	
$G_4$	-1	1	—	$\gamma \notin [180, 270]$	$M_{-,-}$	2 тип	1 тип	
$G_5$	1	1	—	$\gamma \in [90, 270]$	$M_{+,+}$	1 тип	1 тип	
$G_6$	1	1	—	$\gamma \in [90, 270]$	$M_{+,-}$	1 тип	2 тип	
$G_7$	-1	-1	—	$\gamma \in [90, 270]$	$M_{-,-}$	1 тип	1 тип	
$G_8$	-1	-1	—	$\gamma \in [90, 270]$	$M_{-,+}$	1 тип	2 тип	
$G_9$	0	1	$K_c \in [K_{c \min}, K_{c \max}]$	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{o,+}$	-	1 тип	$V_v > V_c$
$G_{10}$	0	1	—	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{o,+}$	-	1 тип	$V_v \leq V_c$

Продовження табл. 3.1

$G_i$	$q_v$	$q_c$	$\Delta K$	$\gamma$	$M_{i,j}$	$Tr_v$	$Tr_c$	Прим.
$G_{11}$	0	1	$K_c \in [K_{c \max}, K_{c \min}]$	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{o,+}$	-	1 тип	$V_v > V_c$
$G_{12}$	0	-1	$K_c \in [K_{c \min}, K_{c \max}]$	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{o,-}$	-	1 тип	$V_v > V_c$
$G_{13}$	0	-1	—	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{o,-}$	-	1 тип	$V_v \leq V_c$
$G_{14}$	1	0	$K_v \in [K_{v \min}, K_{v \max}]$	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{+,o}$	1 тип	—	$V_c > V_v$
$G_{15}$	1	0	—	$\gamma \in [90, 180]$	$M_{+,o}$	1 тип	—	$V_c \leq V_v$
$G_{16}$	1	0	$K_v \in [K_{v \max}, K_{v \min}]$	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{+,o}$	1 тип	—	$V_c > V_v$
$G_{17}$	-1	0	$K_v \in [K_{v \min}, K_{v \max}]$	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{-,o}$	1 тип	—	$V_c > V_v$
$G_{18}$	-1	0	—	$\gamma \in [180, 270]$	$M_{-,o}$	1 тип	—	$V_c \leq V_v$

У наведеній таблиці знаходяться ситуації та парні маневри, що належать до першої підмножини  $Mn_1$ , для яких характерно збільшення дистанції між судном і ціллю.

### 3.3. Розробка методу оперативного управління судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації

Отримані в попередніх підрозділах результати вибору маневру виходу судна на програмну траєкторію руху носять характер першого наближення вирішення поставленого завдання. Справа в тому, що тип траєкторії повернення судна (з трьох можливих) на програмну траєкторію визначається значеннями відносного курсу  $K_{oto}$  та швидкістю його зміни  $\omega_{ot}$ , згідно з виразом (3.1). Однак значення та знак відносної кутової швидкості  $\omega_{ot}$  змінюється протягом часу (рис. 3.4), навіть якщо курс змінює тільки оперуюче судно з постійною кутовою швидкістю, водночас змінюється величина відносного курсу  $K_{oto}$ . Під час маневрування суден на невеликих відстанях

відбуваються значні зміни пеленгу на ціль, а реальний характер поведінки судна під час повороту відрізняється від поведінки, описаної наближеною моделлю обертального руху з постійною кутовою швидкістю. В силу зазначених причин раніше розглянутими процедурами можна робити лише наближений висновок про характер зміни дистанції між суднами протягом усього маневру повернення судна на програмну траєкторію.

Тому з метою підвищення ефективності вибору безпечного маневру виходу судна на програмну траєкторію руху пропонується метод оперативного керування судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації, що враховує раніше отримані теоретичні результати та забезпечує як відсутність небезпечного зближення з ціллю, так і точний вихід на програмну траєкторію руху.

У даному методі використовуються три раніше розглянуті типи траєкторії повернення судна на програмну траєкторію руху, а реалізація методу передбачена на сучасних комп'ютерах, що володіють високою швидкістю.

Допустимість використання кожного з типів траєкторії визначається її безпекою, що характеризується співвідношенням дистанції найкоротшого зближення.  $\min L$  із гранично допустимою дистанцією  $L_d$ . Якщо для траєкторії виконується нерівність  $\min L \geq L_d$ , то траєкторія є допустимою. Якщо для певної початкової ситуації допустимими є кілька типів, то вибирається той, для реалізації якого потрібно менше часу. За витратами часу найкращим є перший тип траєкторії, потім другий тип і найбільше часу йде на реалізацію третього типу.

Слід зазначити, що перший та другий типи траєкторій виходу судна можуть бути як допустимими, так і небезпечними, тоді як третій тип (за визначенням) завжди допустимий. Тому алгоритм вибору безпечного оптимального за витратами часу маневру повернення судна на програмну траєкторію полягає в наступному.

Оскільки найкращим є перший тип траєкторії, то спочатку проводиться перевірка допустимості його реалізації, для чого слід визначити дистанцію

мінімального зближення  $\min L_1$  та порівняти її зі значенням гранично допустимої дистанції  $L_d$ . Величина дистанції  $L_d$  задана, а значення  $\min L_1$  слід визначити. Для цього за запропонованою в роботі моделі розраховуються параметри маневру розходження з першим типом траєкторії, що використовуються як перше наближення. Потім, використовуючи динамічну модель судна, яка найбільше адекватно описує рух судна під час маневрування, прораховують його координати  $X_v(t)$ ,  $Y_v(t)$  через невеликі інтервали часу  $\Delta t$ , одночасно, виходячи з параметрів руху цілі та її кутової швидкості, якщо вона виконує поворот, розраховують її координати  $X_c(t)$ ,  $Y_c(t)$ . За допомогою отриманих координат на кожний інтервал часу  $\Delta t$  здійснюється розрахунок поточної дистанції  $L_t$  між суднами:

$$L_t = \sqrt{[X_c(t) - X_v(t)]^2 + [Y_c(t) - Y_v(t)]^2}.$$

Прорахувавши за допомогою комп'ютера дистанції між судном та ціллю протягом усього маневру повернення, вибирається найменша  $\min L_1$ , яка порівнюється з гранично допустимою  $L_d$ , у результаті визначається допустимість першого типу траєкторії повернення судна. Якщо маневр є допустимим, то отримані після його прорахунку уточнені параметри маневру повернення, методику визначення яких розглянемо пізніше, реалізуються в реальному маневрі повернення судна. У цьому випадку судно може повернутися на програмну траєкторію з мінімальними втратами часу.

Якщо ж перший тип траєкторії повернення в результаті порівняння величин  $\min L_1$  і  $L_d$  виявиться неприпустимим, слід провести перевірку другого типу траєкторії повернення. Для цього за раніше отриманими аналітичними виразами проводиться розрахунок параметрів маневру повернення з використанням другого типу траєкторії, а потім, аналогічно до попереднього випадку, проводиться прорахунок координат судна, цілі та дистанції між ними.

Мінімальне значення дистанції між ними  $\min L_2$  і дистанції  $L_d$  визначають допустимість другого типу траєкторії повернення судна. У разі допустимості траєкторії судном провадиться реалізація маневру з уточненими під час прорахунку параметрами.

В іншому випадку проводиться розрахунок параметрів маневру третім типом траєкторії повернення, виконується його прорахунок, визначення величини  $\min L_3$  та її допустимість.

За недостатнього для допустимості маневру повернення значення  $\min L_3$  необхідно збільшити час проходження судна курсом ухилення, що веде до зростання величини дистанції найкоротшого зближення, та повторно прорахувати значення  $\min L_3$ . Для отримання допустимого маневру виходу з третім типом траєкторії повернення потрібно трохи більше трьох ітерацій.

Для підвищення точності попередніх значень параметрів маневру виходу з використанням будь-якого типу траєкторій повернення можна використовувати математичні моделі обертального руху судна, що враховують динаміку судна у поворотності. Так, у роботі [26] розроблено метод розрахунку тимчасових поправок для врахування інерційності судна під час виконання поворотів.

Для розрахунку тривалості повороту судна  $\tau$  та збільшення його координат  $\Delta X_v$  і  $\Delta Y_v$  слід використовувати третю (найточнішу) динамічну модель зміни курсу судна  $K$  під час його повороту в залежності від кута кладки пера керма  $\beta_k$ , яка описується неоднорідним лінійним диференціальним рівнянням третього порядку з постійними коефіцієнтами, що має такий вигляд [26]:

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

де  $T_1$  і  $T_2$  – постійні часу, що характеризують інерційні властивості судна;

$k_\omega$  – коефіцієнт ефективності керма.

Для повороту судна використовують дві фази кладки пера керма. На першій фазі, у початковий момент часу проводиться перекидка керма на певний кут  $\beta_k$  і кермо утримується в такому положенні протягом інтервалу часу  $\tau_1$ . Після цього проводиться перекидка пера керма на протилежний борт на ту саму величину і гаситься інерція повороту судна протягом інтервалу часу  $\tau_2$ , після закінчення якого судно виходить на заданий курс, кутова швидкість повороту обертається в нуль, а перо керма наводиться в діаметральну площину судна.

Отже, до розрахунку величини часу повороту судна  $\tau$  необхідно обчислити інтервали часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$ , які у сумі дають її величину.

Очевидно, що поточне значення курсу судна на першій і другій фазах повороту має різний аналітичний вираз, тому поточне значення курсу судна на першій фазі повороту позначено через  $\bar{K}$ , а на другий – через  $\tilde{K}$ .

Значення курсу судна на першій та другій фазах повороту, які відрізняються положенням пера керма відносно діаметральної площини судна, мають наступні аналітичні вирази.

На першій фазі повороту, тривалість якої становить інтервал часу  $\tau_1$ , поточне значення курсу судна описується аналітичним виразом:

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

де  $a_{\omega} = k_{\omega} \beta_k$  – значення кутової швидкості повороту судна, що встановилася після перекидки пера керма на кут  $\beta_k$ .

На другій фазі повороту після завершення інтервалу часу  $\tau_1$  виконується перекидка пера керма на протилежний борт на кут  $-\beta_k$  і впродовж інтервалу часу  $\tau_2$  відбувається отримання судна. У цьому випадку поточне значення курсу описується виразом:

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

Враховуючи, що під час повороту збільшення курсу судна на першій і другій фазах має дорівнювати заданій зміні курсу, а кутова швидкість до моменту завершення повороту повинна обертатися в нуль, інтервали часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$  знаходяться за допомогою виразів:

$$\begin{aligned} \tau_1 = \tau_2 + \left\{ T_1^2 [1 - \exp(-\tau_1/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\tau_1/T_2)] \right\} / (T_1 - T_2) - \\ - \left\{ 2 - \left[ T_1 \exp(-\tau_1/T_1) - T_2 \exp(-\tau_1/T_2) \right] / (T_1 - T_2) \right\} \times \quad (3.22) \\ \times \left\{ T_1^2 [1 - \exp(-\tau_2/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\tau_2/T_2)] \right\} / (T_1 - T_2) + K/a_{\omega}, \end{aligned}$$

де  $\Delta K$  – задана зміна курсу протягом маневру.

Друге рівняння, що характеризує зв'язок  $\tau_1$  і  $\tau_2$  має вигляд:

$$\begin{aligned} \tau_2 = -T_1 \ln \left\{ (T_2/T_1) \exp(-\tau_2/T_2) + [(T_1 - T_2)/T_1] \right\} \times \quad (3.23) \\ \times \left\{ 2 - \left[ T_1 \exp(-\tau_1/T_1) - T_2 \exp(-\tau_1/T_2) \right] / (T_1 - T_2) \right\}^{-1}. \end{aligned}$$

Таким чином, для розрахунку величин  $\tau_1$  і  $\tau_2$  методом простих ітерацій, задаючись попереднім значенням  $\tau_1$ , за допомогою виразу (3.23) обчислюється значення  $\tau_2$ , яке потім підставляється у вираз (3.22) для розрахунку наступного значення  $\tau_1$ . Слід зазначити, що для початкового наближення слід вибрати значення  $\tau_1$  і  $\tau_2$ , отримані з математичної моделі обертального руху першого ладу, тобто  $\tau_1 = \Delta K/a_{\omega}$ ,  $\tau_2 = 0$ .

Збільшення координат  $\Delta X_v$  і  $\Delta Y_v$  маневруючого судна знаходяться з виразів:

$$\Delta X_v = \int_0^{\tau_1} V_v \sin[K_{vo} + \bar{K}] dt + \int_0^{\tau_2} V_v \sin[K_{vo} + K(\Delta\tau_1) + \tilde{K}] dt,$$

$$\Delta Y_v = \int_0^{\tau_1} V_v \cos[K_{vo} + \bar{K}] dt + \int_0^{\tau_2} V_v \cos[K_{vo} + K(\Delta\tau_1) + \tilde{K}] dt,$$

причому обчислення певних інтегралів здійснюється методом Сімпсона.

За допомогою наведених виразів розраховуються початкові значення параметрів маневру повернення судна програмну траєкторію з урахуванням типу траєкторії повернення. Оскільки курс виходу  $K_b$  судна на програмну траєкторію та його програмний курс  $K_o$  є заданими величинами, необхідно розрахувати тільки моменти часу початку і кінця поворотів  $t_{bn}$ ,  $t_{bk}$ ,  $t_{kn}$  і  $t_{kk}$ .

Під час перевірки допустимості маневру виходу, коли проводиться прорахунок дистанції між суднами через невеликі інтервали часу, також фіксуються відповідні моменти часу та значення поточного курсу судна. Якщо уточнені параметри маневру повернення позначити  $\tilde{t}_{bn}$ ,  $\tilde{t}_{bk}$ ,  $\tilde{t}_{kn}$  і  $\tilde{t}_{kk}$ , то очевидно, що  $\tilde{t}_{bn} = t_{bn}$ . Значенню  $\tilde{t}_{bk}$  відповідає момент часу, коли під час прорахунку маневру виходу поточне значення курсу судна  $K_v$  досягне величини курсу  $K_b$ . Цей момент часу відповідає закінченню повороту судна за найбільш адекватною математичною моделлю, що описує його рух. Отже, закінчення повороту судна на курс повернення визначається співвідношенням  $\tilde{t}_{bk} = t(K_v = K_b)$ . Надалі судно рухається прямолінійною ділянкою із постійними параметрами руху. Для визначення уточненого значення часу початку повороту на програмну траєкторію руху  $\tilde{t}_{kn}$  спочатку необхідно порахувати тривалість повороту судна  $\tilde{\tau}_k$  з курсу  $K_b$  на програмний курс  $K_o$ . Для цього необхідно зафіксувати моменти часу початку зміни курсу  $K_b$  та досягнення курсу судна величини програмного курсу  $K_o$ , тобто  $\tilde{\tau}_k = t(K_v = K_o) - t[\min(K_v - K_b)]$ . За значеннями координат судна на ці

моменти часу визначається нормальна відстань  $L_k$  до програмної траєкторії на момент початку повороту судна  $\tilde{t}_{kn}$ , як показано на рис. 4.6, на момент часу  $\tilde{t}_{bk}$  визначається відстань  $L_b$ . За отриманими параметрами розраховується час  $\tilde{t}_{kn}$  за формулою (рис.3.9):

$$\tilde{t}_{kn} = \tilde{t}_{bk} + \frac{(L_y - L_k)}{V_v \sin(K_o - K_b)}.$$

Завершальний уточнений момент часу визначається співвідношенням:

$$\tilde{t}_{kk} = \tilde{t}_{kn} + \tilde{\tau}_k.$$

Таким чином проводиться перевірка допустимості маневру повернення методом оперативного керування судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації з урахуванням найбільш адекватної моделі руху судна та отримання уточнених параметрів маневру.

### Висновки з третього розділу дисертації

У третьому розділі розглянуто метод вибору маневру повернення суден після ухилення на програмні траєкторії руху за малих початкових дистанцій.

Спочатку отримано метод вибору маневру повернення судна на програмну траєкторію руху без координації із ціллю. Показано, що якщо ситуація небезпечного зближення не дозволяє судну розійтися з ціллю на гранично допустимій дистанції, то початок маневру виходу судна на програмну траєкторію руху проводиться в момент часу, коли поточна дистанція зросте до значення гранично допустимої. Отримано обов'язкову умову безпечного повернення судна на програмну траєкторію руху, що полягає в тому, що дистанція між суднами має збільшуватися за умови повороту судна для

повернення у бік програмної траєкторії.

Показано, що поточна дистанція на етапі повернення судна на програмну траєкторію руху буде збільшуватись, якщо початковий відносний курс укладений у секторі від значення  $\alpha_o + \pi/2$  до значення  $\alpha_o + \pi$ , та зростає у часі. Встановлено три підмножини ситуацій залежно від співвідношення величин початкового відносного курсу та відносної кутової швидкості. До першої підмножини відносяться безпечні ситуації, у яких забезпечене гарантоване зростання дистанції між судном і ціллю, другу підмножину складають ситуації, коли дистанція між судном і ціллю скорочується і, нарешті, до третьої підмножини ситуацій відносяться ті, для яких можливе як збільшення дистанції, так і зменшення.

Виявлено три можливі типи траєкторій повернення судна на програмну траєкторію та знайдено аналітичні вирази для розрахунку їхньої величини.

У розділі запропоновано спосіб повернення суден на програмні траєкторії руху з урахуванням їхньої координатії. Розглянуто принцип координатії суден в процесі вибору ними безпечних маневрів повернення на програмні траєкторії руху, згідно з яким кожне з суден під час маневру може вибрати один із трьох варіантів: повороту вправо, повороту вліво або продовжити слідувати незмінним курсом, і вибір парного маневру для судна та цілі залежно від початкової ситуації, яка забезпечує їх безпечне повернення на програмні траєкторії. Також суттєвою є зміна відносного курсу від зміни курсу судна та цілі. В розділі знайдено таку залежність.

Визначено, що парні маневри судна й цілі становлять набір із восьми можливих варіантів (за винятком варіант сталості курсів судна та цілі) і для кожної початкової ситуації обрано найбільш підходящий парний маневр з урахуванням типу траєкторій повернення на програмну траєкторію руху.

Здійснено розробку методу оперативного керування судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації, який враховує раніше отримані теоретичні результати та забезпечує як відсутність небезпечного зближення з ціллю, так і точний вихід на програмну траєкторію

руху.

У цьому методі використано три раніше розглянуті типи траєкторії повернення судна на програмну траєкторію руху, а реалізація методу передбачена на сучасних комп'ютерах, що мають високу швидкодію.

Для кожного з типів траєкторії проводиться перевірка допустимості його реалізації, для чого визначається дистанція мінімального зближення та порівнюється зі значенням гранично допустимої дистанції. Для визначення дистанції мінімального зближення за запропонованою у роботі моделі розраховуються параметри маневру розходження, які використовуються як перше наближення. Потім, використовується динамічна модель судна, яка найбільше адекватно описує його рух під час маневрування, прораховуються його координати через невеликі інтервали часу, одночасно, виходячи з параметрів руху цілі та її кутової швидкості, якщо вона виконує поворот, розраховують її координати. За допомогою отриманих координат на кожний інтервал часу  $\Delta t$  проводиться розрахунок поточної дистанції між суднами..

Прорахувавши за допомогою комп'ютера дистанції між судном та ціллю протягом усього маневру повернення, вибирається найменша, яка порівнюється з гранично допустимою, у результаті визначається допустимість обраного типу траєкторії повернення судна. Якщо маневр є допустимим, то отримані в результаті його прорахунку уточнені параметри маневру повернення реалізуються у реальному маневрі повернення судна.

Основні результати розділу надруковані у роботах [138, 139].

## РОЗДІЛ 4

### ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 4.1. Алгоритм вибору маневру повернення судна на програмну траєкторію руху

Як було показано в попередньому розділі, для повернення судна на програмну траєкторію руху необхідна початкову ситуацію  $G$  ідентифікувати з однією з трьох підмножин  $Mn_1$ ,  $Mn_2$  або  $Mn_3$ , кожна з яких визначає свій тип траєкторії повернення судна та алгоритм розрахунку параметрів маневру.

Для ідентифікації початкової ситуації  $G$  необхідно розрахувати початковий відносний курс  $K_{oto}$  та швидкість його зміни, тобто відносну кутову швидкість  $\omega_{otb}$ .

Початковим відносним курсом  $K_{oto}$  є відносний курс ухилення. Його обчислення проводиться за параметрами руху судна й цілі за допомогою виразу:

$$K_{oto} = \arcsin \left[ \frac{V_v \sin K_{vo} - V_c \sin K_{co}}{V_{oto}} \right],$$

де  $K_{vo}$ ,  $V_v$ ,  $K_{co}$  и  $V_c$  – значення початкового курсу та швидкості відповідно судна та цілі;

$V_{oto}$  – початкова відносна швидкість, причому

$$V_{oto} = \left[ V_v^2 + V_c^2 - 2 V_v V_c \cos(K_{vo} - K_{co}) \right]^{1/2} ..$$

Для розрахунку значення відносної кутової швидкості  $\omega_{otb}$  окрім початкових параметрів руху судна необхідно знати значення кутових швидкостей повороту судна  $\omega_{vb}$  і цілі  $\omega_c$ . Значення кутової швидкості  $\omega_{otb}$  є функцією часу.

Розрахунок значення відносної кутової швидкості  $\omega_{otb}$  для ситуації, коли одночасно повертають судно і ціль проводиться за допомогою наступного аналітичного виразу:

$$\omega_{otb} = \frac{V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) \omega_{vb} - V_c \cos(K_{cy} + \omega_c t) \omega_c}{V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) + V_c \cos(K_{cy} + \omega_c t)} - \frac{\left[ V_v \sin(K_{vy} + \omega_{vb}t) - V_c \sin(K_{cy} + \omega_c t) \right] V_v V_c \sin(\Delta K_y + \Delta \omega_b t) \Delta \omega_b}{\left[ V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) + V_c \cos(K_{cy} + \omega_c t) \right] V_{ot}^2},$$

де  $\Delta \omega_b = \omega_{vb} - \omega_c$  и  $\Delta K_y = K_{vy} - K_{cy}$ ;

$K_{vy}$  і  $K_{cy}$  – курси ухилення відповідно судна і цілі.

Якщо поворот виконує тільки судно, а ціль рухається з постійними значеннями курсу та швидкості, то відносна кутова швидкість  $\omega_{otb}$  розраховується за допомогою наступної формули:

$$\omega_{otb} = \frac{V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) \omega_{vb}}{V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) + V_c \cos K_{cy}} - \frac{\left[ V_v \sin(K_{vy} + \omega_{vb}t) - V_c \sin K_{cy} \right] V_v V_c \sin(\Delta K_y + \omega_{vb}t) \omega_{vb}}{\left[ V_v \cos(K_{vy} + \omega_{vb}t) + V_c \cos K_{cy} \right] V_{ot}^2}.$$

За цих умов суттєвим є потрібний бік повороту судна для виходу на програмну траєкторію, яка задається необхідним знаком кутової швидкості судна  $\omega_{vb}$ , тобто  $sign(\omega_{vb}) = -sign(\Delta K_y)$ , що означає зміну курсу судна у бік

протилежний відхиленню від програмної траєкторії.

Умовою належності початкової ситуації  $G$  до підмножини  $Mn_1$ , як показано у попередньому розділі, є початкове значення відносного курсу  $K_{oto}$ , що забезпечує зростання початкової дистанції між судном і ціллю, та її зміна у бік, що забезпечує подальше зростання дистанції між судном та ціллю. За такої умови судно має повертати у бік програмної траєкторії. Аналітично зазначені вимоги виражаються так:

$$G \in Mn_1, \text{ якщо } \{K_{oto} \in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi] \text{ і } \omega_{ot} > 0\},$$

або

$$\{K_{oto} \in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} < 0\}; \text{ sign}(\omega_{vb}) = -\text{sign}(\Delta_y).$$

Умова, що описує належність початкової ситуації  $G$  до підмножини  $Mn_2$ , коли поворот судна до програмної траєкторії руху супроводжуватиметься зменшенням дистанції між судном і ціллю, аналітично виражається наступним співвідношенням значень відносного початкового курсу  $K_{oto}$  та знаку кутової відносної швидкості  $\omega_{ot}$ :

$$G \in Mn_2, \text{ якщо } \{K_{oto} \in [\alpha_o - \pi/2, \alpha_o] \text{ і } \omega_{ot} > 0\},$$

або

$$\{K_{oto} \in [\alpha_o, \alpha_o + \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} < 0\}; \text{ sign}(\omega_{vb}) = -\text{sign}(\Delta_y).$$

Належність початкової ситуації  $G$  до підмножини  $Mn_3$ , яке характеризується невизначеними ситуаціями, що можуть викликати як зростання, так і зменшення дистанції між судном та ціллю через різний вплив початкового відносного курсу  $K_{oto}$  та відносної кутової швидкості  $\omega_{ot}$  на зміну зазначеної дистанції, визначається аналітичними виразами, що мають вигляд:

$$G \in Mn_3, \text{ якщо } \{K_{oto} \in [\alpha_o - \pi/2, \alpha_o] \text{ і } \omega_{ot} < 0\},$$

або

$$\{K_{oto} \in [\alpha_o, \alpha_o + \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} > 0\};$$

або

$$\{K_{oto} \in [\alpha_o + \pi/2, \alpha_o + \pi] \text{ і } \omega_{ot} < 0\};$$

або

$$\{K_{oto} \in [\alpha_o + \pi, \alpha_o - \pi/2] \text{ і } \omega_{ot} > 0\}; \text{ sign}(\omega_{vb}) = -\text{sign}(\Delta_y).$$

Залежно від того, до якої підмножини ситуацій  $Mn_i$  ( $i = 1 \dots 3$ ) належить початкова ситуація  $G$ , проводиться визначення початкового типу траєкторії повернення. В разі  $G \in Mn_1$  початковим є найкращий перший тип траєкторії повернення.

Параметри маневру за цього типу траєкторії повернення розраховуються так. Відстань до програмної траєкторії на момент початку повороту  $L_k$  обчислюється за формулою:

$$L_k = R_c (1 - \cos \Delta K_y),$$

де  $R_c$  – радіус циркуляції судна.

Моменти часу початку  $t_{bn}$ ,  $t_{kn}$  і закінчення  $t_{bk}$ ,  $t_{kn}$  поворотів судна розраховуються за формулами:

$$\Delta t_{bn} = 2\Delta K_y / \omega_v, \quad t_{bk} = t_{bn} + \Delta t_{bn}.$$

$$S_b = \frac{(L_y - L_k)}{\sin \Delta K_y},$$

$$t_{kn} = t_{bk} + \frac{(L_y - L_k)}{V_v \sin \Delta K_y}, \quad t_{kk} = t_{kn} + \Delta K_y / \omega_v.$$

У разі, коли  $G \in Mn_2$ , перевіряється можливість зробити маневр виходу судна за допомогою другого типу траєкторії, яка передбачає поворот судна на протилежний бік з кутовою швидкістю  $\omega_{vb} = \text{sign}(\Delta_y) \omega_{V_{\max}}$  і за допомогою циркуляції провадиться повернення судна на програмну траєкторію. Якщо маневр розходження симетричний відносно програмної траєкторії, параметри маневру розраховуються так:

$$t_{bk} = t_{bn} + 2(\pi - \Delta K_y) / \omega_V.$$

$$t_{kn} = t_{bk} + \frac{(L_y - L_k)}{V_v \sin \Delta K_y}, \quad t_{kk} = t_{kn} + \Delta K_y / \omega_V.$$

У разі, коли між курсами ухилення  $K_y$  та повернення на програмну траєкторію  $K_b$  немає симетричної залежності, тобто  $K_b = K_o - \gamma$  під час ухилення судна вправо, причому  $\gamma = 30 \div 40^\circ$ , розрахунок параметрів маневру виходу розраховується так.

Спочатку проводиться розрахунок координат базових точок:

$$X_{vo} = -S_v \cos K_o; \quad Y_{vo} = S_v \sin K_o.$$

$$X_{vk} = R_c [\cos K_y - \cos(K_y - K_b)]; \quad Y_{vk} = R_c [\sin(K_y - K_b) - \sin K_y].$$

$$X_{vp} = \cos K_o [X_{vo} \cos K_o + (Y_{vk} - Y_{vo}) \sin K_o] / (\cos^2 K_o - \sin^2 K_o);$$

$$Y_{vp} = [Y_{vo} \sin K_o + (X_{vp} - X_{vo}) \cos K_o] / \sin K_o.$$

Потім обчислюється дистанція  $L_b$ :

$$L_b = \sqrt{(X_{vp} - X_{vk})^2 + (Y_{vp} - Y_{vk})^2}.$$

Розрахунок параметрів маневру здійснюється за формулами:

$$t_{bk} = t_{bn} + \left[ 2\pi - (K_y - K_b) \right] / \omega_v, \quad t_{kn} = t_{bk} + \frac{(L_b - L_k)}{V_v \sin \Delta K_y}, \quad t_{kk} = t_{kn} + (K_b - K_o) / \omega_v \dots$$

У випадку, коли  $G \in Mn_3$  необхідно продовжити рух судна із постійними параметрами, збільшуючи початкову дистанцію  $L_t > L_d$ , до моменту часу  $t_n$ , коли поворот судна, викликаючи скорочення дистанції  $L_t$ , забезпечує її мінімальне значення (третій тип траєкторії), що не перевищує величину  $L_d$ .

Спочатку необхідно розрахувати координати базових точок А, В і С (рис. 4.13) за формулами:

$$\begin{aligned} X_A &= L_d \sin \alpha_o, & Y_A &= L_d \cos \alpha_o; \\ X_B &= L_d \cos K_{otb}, & Y_B &= -L_d \sin K_{otb}. \\ Y_C &= \frac{G}{(\operatorname{tg} K_{oty} - \operatorname{tg} K_{otb})}, & X_C &= X_B + \left( \frac{G}{(\operatorname{tg} K_{oty} - \operatorname{tg} K_{otb})} - Y_B \right) \operatorname{tg} K_{otb}, \end{aligned}$$

де  $G = X_B - X_A + Y_A \operatorname{tg} K_{oty} - Y_B \operatorname{tg} K_{otb}$ .

Відстань  $L_{AC}$  між точками А і С, що визначає момент часу  $t_{b*}$ , визначається з виразу:

$$L_{AC} = \sqrt{(X_C - X_A)^2 + (Y_C - Y_A)^2}.$$

У свою чергу, момент часу  $t_{b*}$  визначається наступною формулою:

$$t_{b*} = \frac{L_{AC}}{V_{oty}} = \frac{\sqrt{(X_C - X_A)^2 + (Y_C - Y_A)^2}}{V_{oty}}.$$

Для розрахунку поправки за інерційність  $\Delta t_b$  розраховується тривалість повороту судна  $\tau$  за формулою:

$$\tau = \frac{Abs(K_b - K_y)}{\omega_{yb}},$$

а потім і сама поправка  $\Delta t_b$ , вважаючи незмінність параметрів цілі, за допомогою аналітичного виразу:

$$\Delta t_b = \left\{ \sin K_{otb} R_c (\sin K_b - \sin K_y) - \cos K_{otb} R_c (\cos K_y - \cos K_b) + \rightarrow \right. \\ \left. V_c \tau \sin(K_{otb} - K_c) \right\} / \left[ V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb}) \right].$$

Параметри часу початку та закінчення повороту судна на курс  $K_b$  визначаються з наступних аналітичних співвідношень:

$$t_{bn} = t_{b*} - \Delta t_b, \quad t_{bk} = t_{bn} + \tau.$$

Моменти часу початку  $t_{kn}$  і закінчення  $t_{kk}$  повороту з курсу  $K_b$  на курс  $K_o$  розраховуються як у попередньому випадку.

Після того, як отримані параметри маневру повернення на програмну траєкторію руху в першому наближенні, необхідно перевірити допустимість маневру за допомогою найбільш адекватної динамічної моделі.  $Md(t)$ , яка описує нелінійний рух судна, одночасно визначаючи уточнені параметри маневру розходження.

Для цього за допомогою прийнятої адекватної динамічної моделі судна здійснюється розрахунок дистанції  $L_t$  між суднами через невеликі фіксовані інтервали часу  $\Delta t$ , відповідні значення поточного курсу  $K_{vt}$  і швидкість  $V_{vt}$  судна, координати судна  $X_{vt}$ ,  $Y_{vt}$  і цілі  $X_{ct}$ ,  $Y_{ct}$ .

Момент часу, коли під час прорахунку маневру виходу поточне значення курсу судна  $K_v$  досягне величини курсу  $K_b$ , відповідає моменту закінчення повороту  $\tilde{t}_{bk}$  судна за найбільш адекватною математичною моделлю  $Md(t)$ , що описує його рух. На цей момент часу визначається відстань  $L_b$ . Далі необхідно порахувати тривалість повороту судна  $\tilde{\tau}_k$  з курсу  $K_b$  на програмний курс  $K_o$  і за значеннями координат судна на моменти часу початку та кінця повороту визначити відстань  $L_k$ . Момент часу  $\tilde{t}_{kn}$  розраховується за допомогою виразу:

$$\tilde{t}_{kn} = \tilde{t}_{bk} + \frac{(L_b - L_k)}{V_v \sin(K_o - K_b)},$$

а завершальний уточнений момент часу визначається співвідношенням:

$$\tilde{t}_{kk} = \tilde{t}_{kn} + \tilde{\tau}_k.$$

На рис. 4.1 наведено алгоритм розрахунку уточнених параметрів маневру повернення судна на програмну траєкторію руху.

Алгоритм визначення інтервалу часу  $\tilde{\tau}_k$  і нормальної відстані  $L_k$  під час повороту судна з курсу  $K_b$  на програмний курс  $K_o$  з одночасним досягненням заданої траєкторії руху показано на рис. 4.2.

#### 4.2. Опис програми імітаційного моделювання вибору безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію

Для перевірки коректності отриманих теоретичних результатів було виконано імітаційне моделювання маневру повернення судна на програмну траєкторію руху у різних ситуаціях та різними типами траєкторії повернення. Моделювання здійснювалося за допомогою комп'ютерної програми, в якій використано аналітичні вирази та алгоритми, отримані в дисертації.

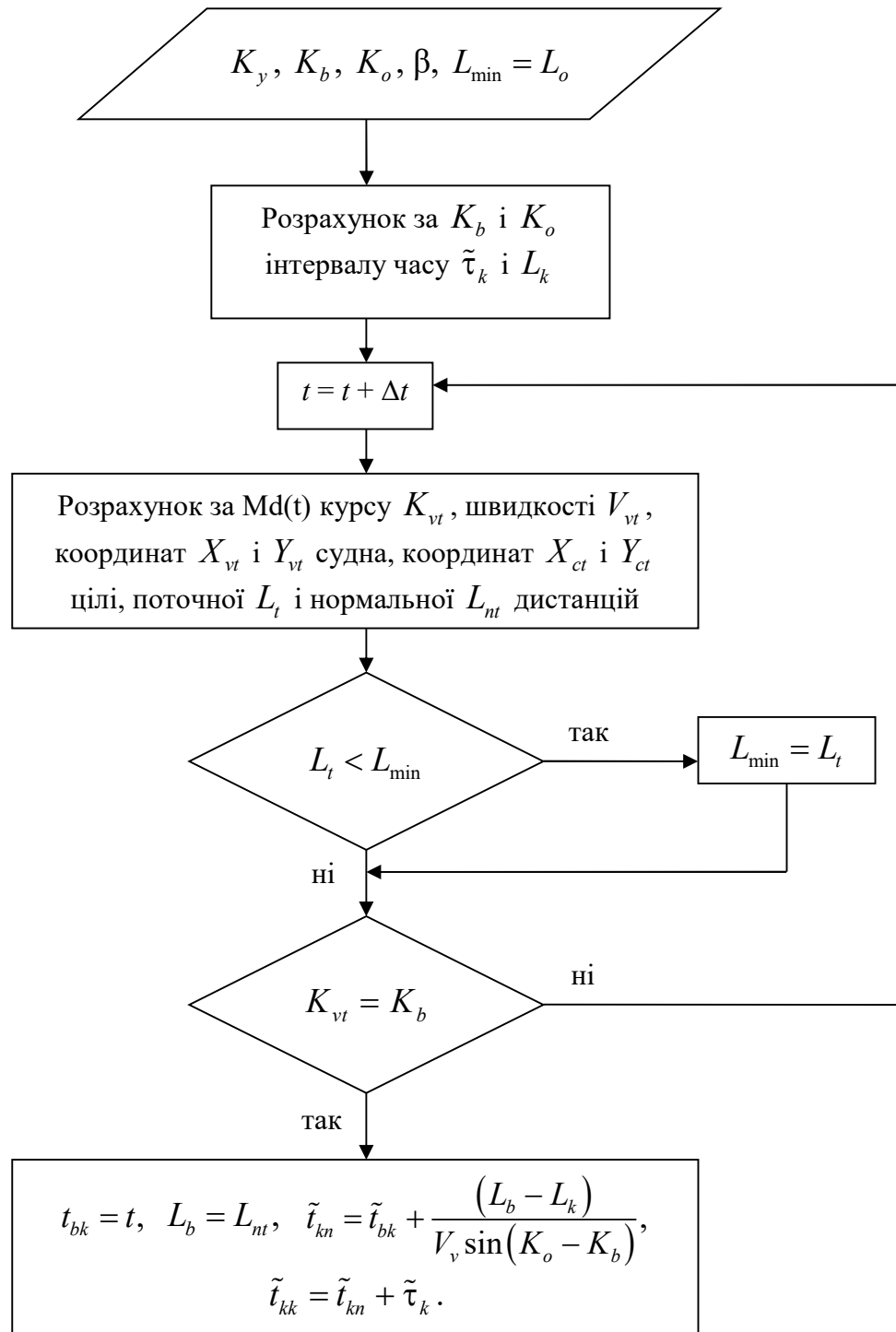


Рис. 4.1 – Алгоритм розрахунку уточнених параметрів маневру повернення судна на програмну траєкторію руху

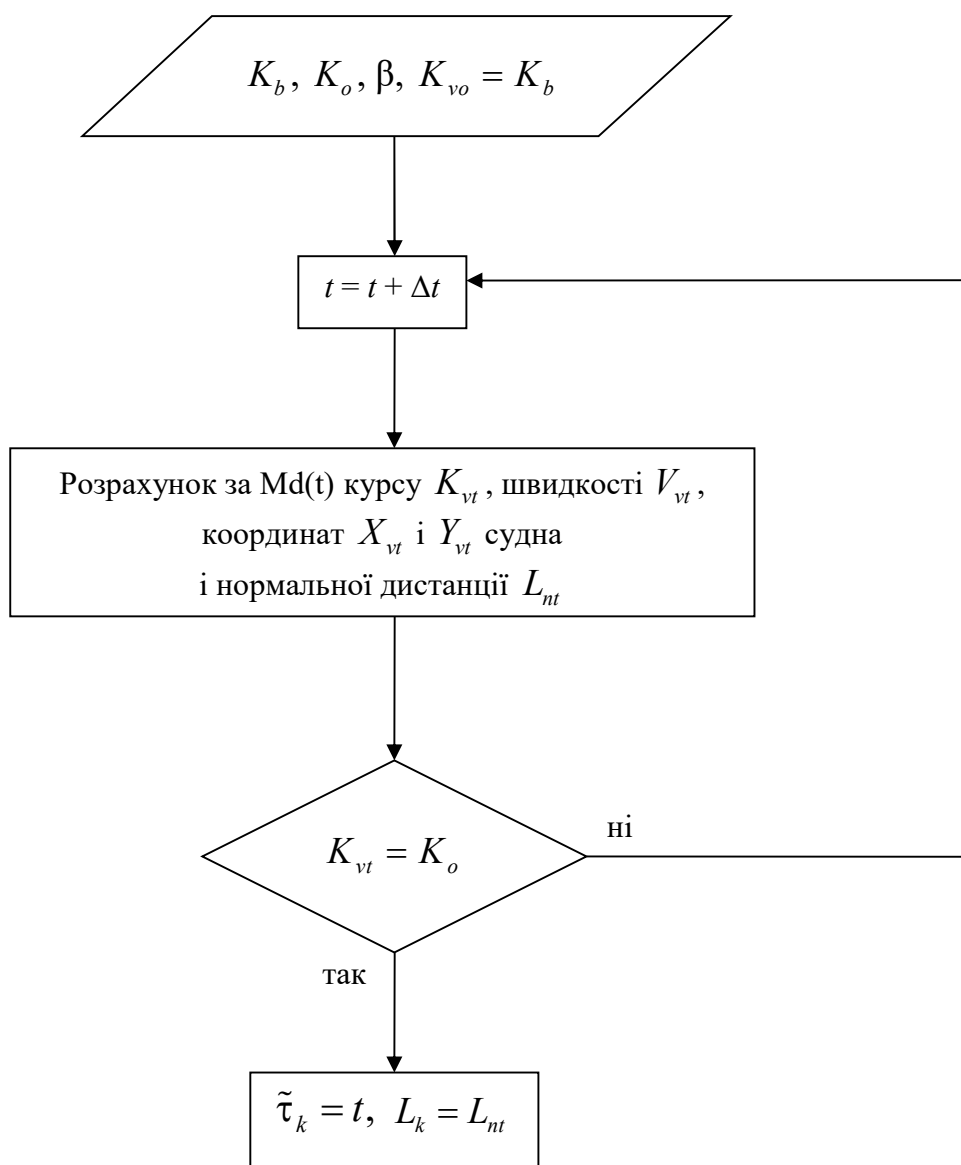


Рис. 4.2 – Алгоритм розрахунку інтервалу часу  $\tilde{\tau}_k$  і нормальної відстані  $L_k$

Імітаційна програма за заданою початковою ситуацією вибирає безпечний маневр повернення і будує його траєкторію. Результуюча інформація подається у відносному та істинному русі. Є можливість програвання маневру.

На рис. 4.3 показано відображення початкової ситуації та траєкторії повернення судна на програмну траєкторію руху. На правій частині екрана показана початкова ситуація та траєкторії руху судна та цілі в істинному русі, а на лівій частині екрана – у відносному русі, коли ціль нерухома і знаходиться в центрі лівої ілюстрації рисунка. Вказана ілюстрація показує зміну дистанції між

судном і ціллю у процесі маневру виходу. Наведена вихідна ситуація, як впливає з рис. 4.3, тільки збільшується. Ілюстрація праворуч показує, що судно не тільки безпечно рухається відносно цілі, але на момент завершення маневру опиняється на програмній траєкторії руху, що відображено в істинному русі судна та цілі.

У правій частині екрана розташована керувальна панель, яка містить ряд керуючих кнопок та інформаційних табло. У моделі передбачено вибір різних варіантів початкової ситуації, причому введення для відтворення номера бажаної ситуації здійснюється за допомогою кнопок «<» та «>». Під зазначеними кнопками розміщується інформаційне табло, на яке виводиться номер ситуації (на рис. 4.3 цифра 1).

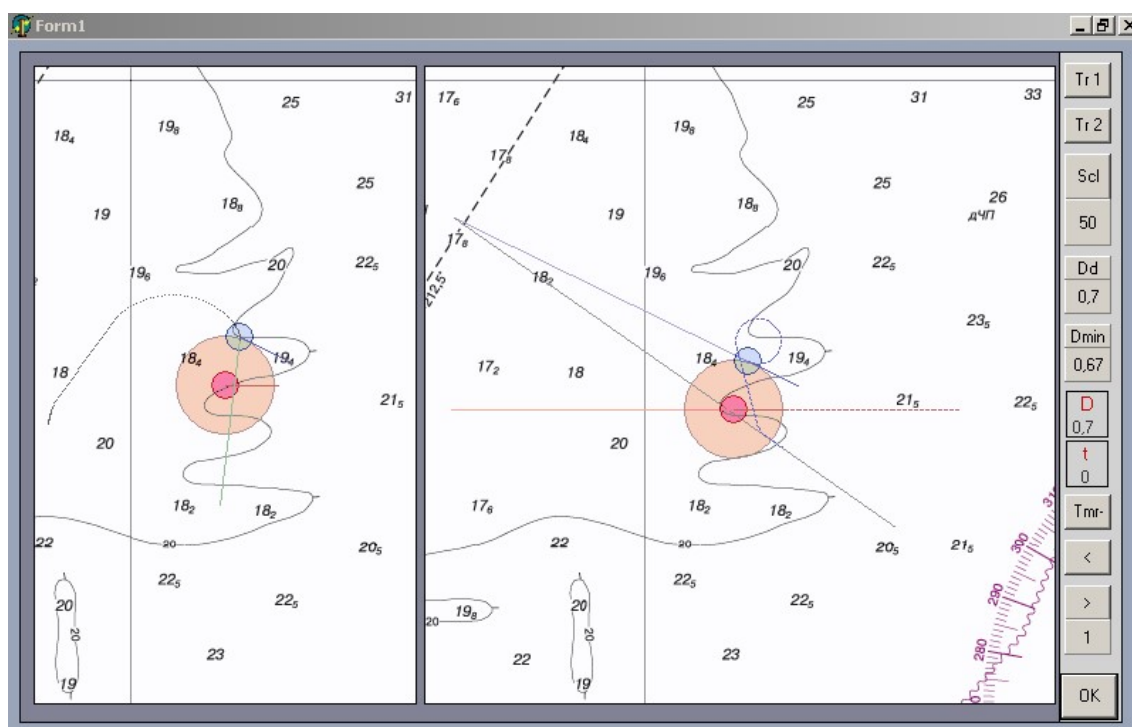


Рис. 4.3 – Відображення початкової ситуації та траєкторії повернення судна на програмну траєкторію руху

Для вибору бажаної ситуації із заданим номером використовується кнопка «OK». Тоді на обидві ілюстрації в істинному та відносному русі виводяться позиції судна і цілі на початковий момент часу та прораховані траєкторії руху

судна і цілі. На інформаційні табло панелі керування виводяться значення гранично допустимої дистанції  $D_d$ , мінімальної дистанції  $D_{min}$ , поточної дистанції  $D$  (відповідно значення 0,7, 0,67 і 0,7 на рис. 5.3) і поточного часу  $t$ .

На рис. 4.4 показано, що зроблено вибір довільної ситуації (номер 7), для якої найкращою безпечною траєкторією повернення на програмну траєкторію є перший тип.

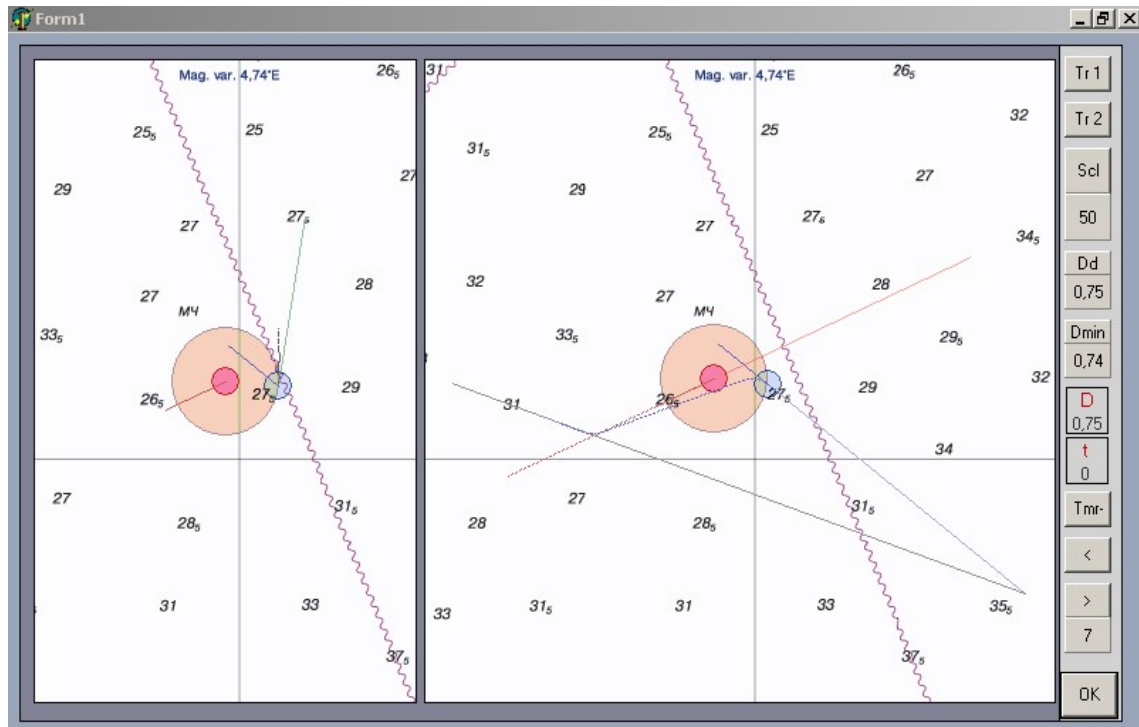


Рис. 4.4 – Вибір різних початкових ситуацій

У верхній частині керувальної панелі є кнопки «Tr1» і «Tr2», за допомогою яких для заданої початкової ситуації можна переглянути відповідно перший і другий тип траєкторій повернення судна на програмну траєкторію руху, оцінити допустимість їх реалізації і провести контроль коректності вибору програмою пріоритетного типу допустимої траєкторії повернення судна на програмну траєкторію руху. На рис. 4.5. показано траєкторію повернення першого типу для 10-ї ситуації, яка демонструється після використання кнопки «Tr1», а на рис. 4.6. – траєкторію повернення другого типу в результаті застосування кнопки «Tr2». З аналізу даних рисунків випливає, що маневр

повернення судна траєкторією першого типу є неприпустимим, оскільки  $D_{\min} = 0,49$  є меншою за  $D_d = 0,7$ . Для траєкторії другого типу  $D_{\min} = 0,7$ , тому вона є допустимою.

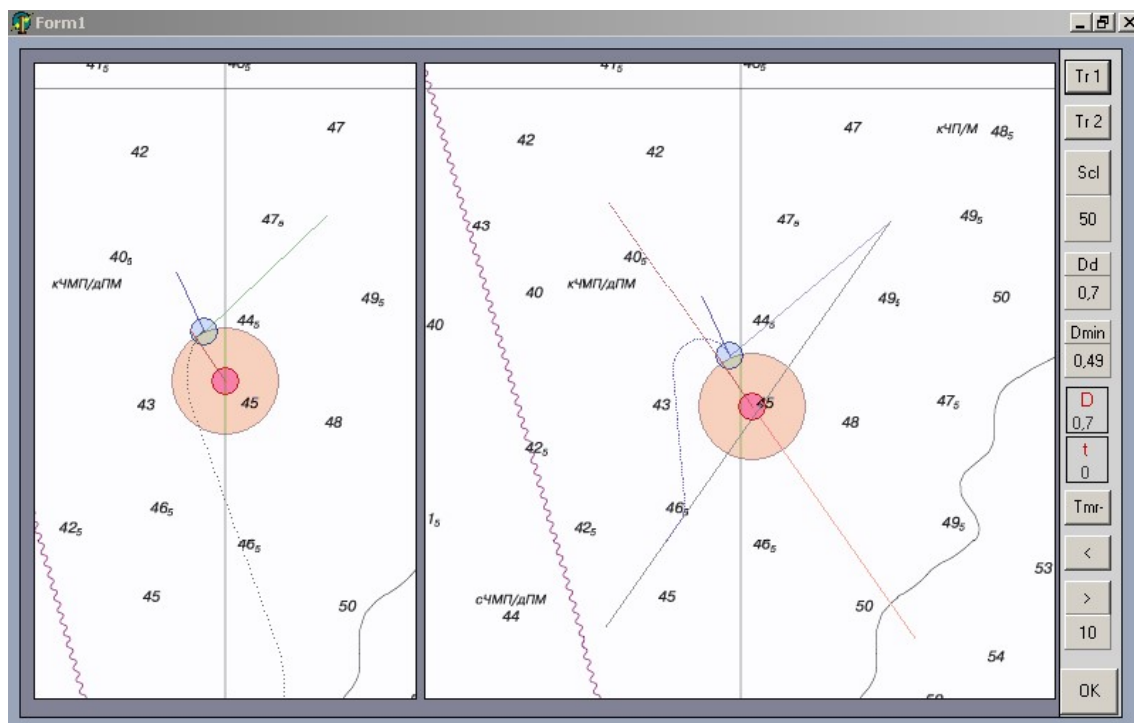


Рис. 4.5 – Перегляд першого типу траєкторії повернення для 10-ї ситуації

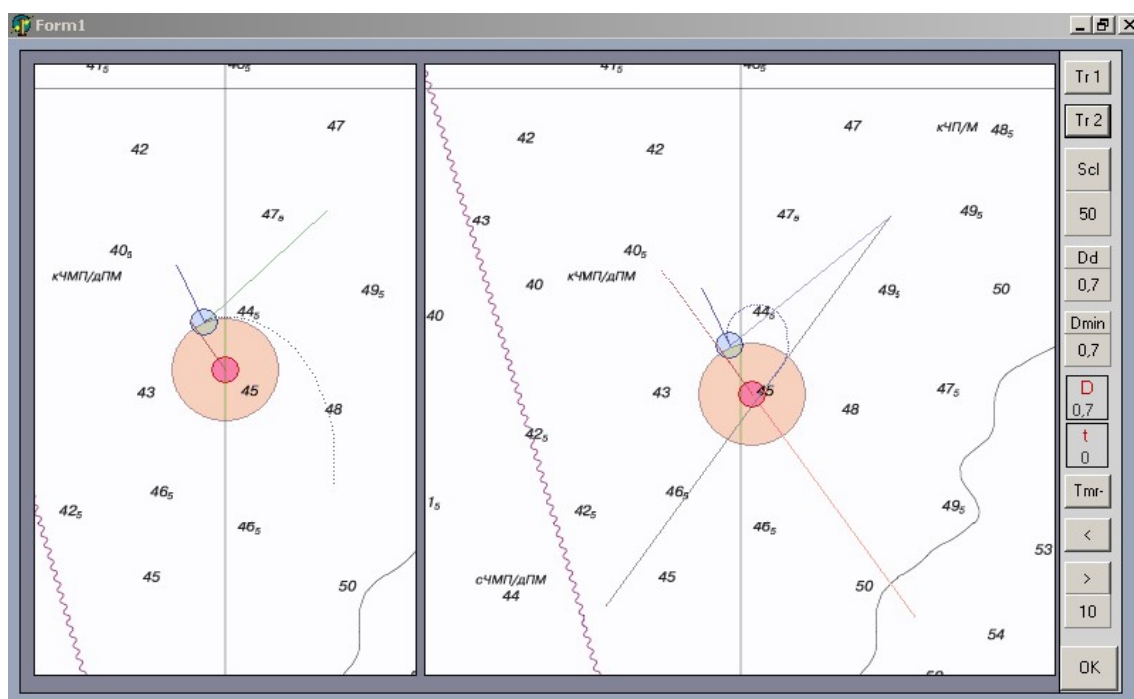


Рис. 4.6 – Перегляд другого типу траєкторії повернення для 10-ї ситуації

На керувальній панелі розміщена кнопка «Scl», за допомогою якої можна змінювати масштаб часу маневру, що програється, повернення з 1 до 500. Значення масштабу індикується на інформаційній панелі під кнопкою «Scl». На рис. 4.7 значення масштабу дорівнює 25, але в попередніх рисунках – 50.

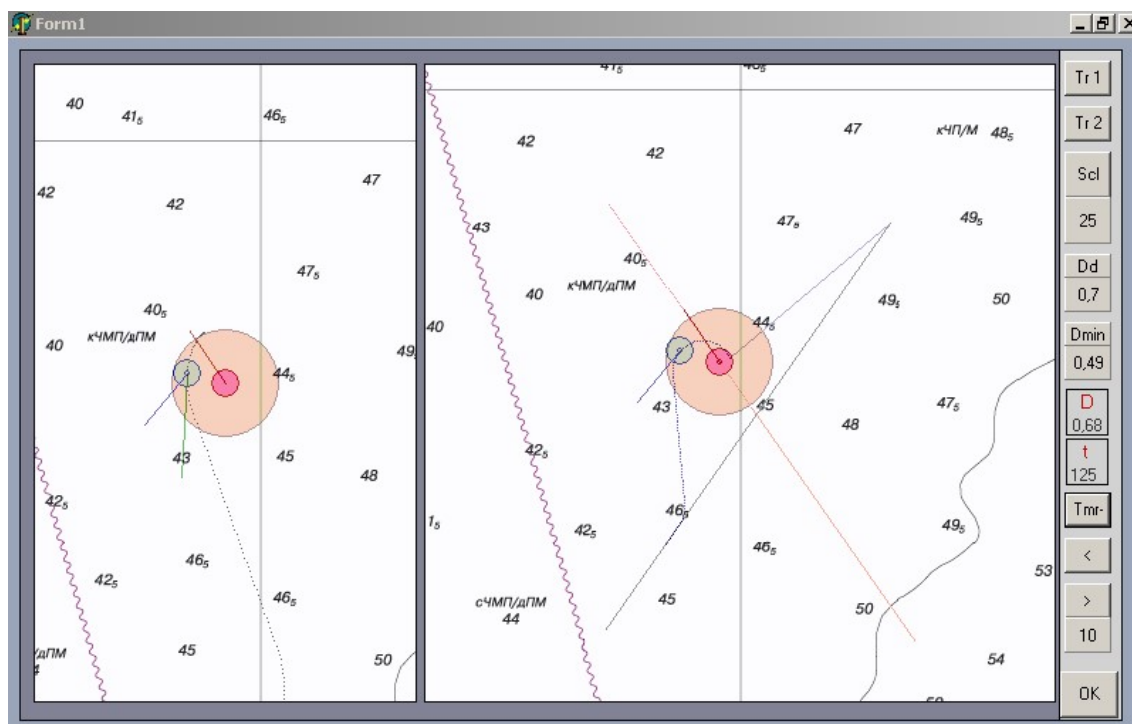


Рис. 4.7 – Програвання маневру повернення та зміна масштабу часу

Програвання маневру здійснюється увімкненням таймера кнопкою «Tmr». На рис. 4.7 показано проміжне положення судна та цілі на траєкторіях у процесі програвання маневру.

Частина початкових ситуацій передбачають рух цілі зі змінним курсом, як показано на рис. 4.8 для ситуації №13. У таких ситуаціях під час імітаційного моделювання маневр виходу на задану траєкторію визначається коректно (рис. 4.9).

На рис. 4.10 показано ситуацію, коли безпечний маневр повернення можливий траєкторією першого типу. На лівій частині екрана наведено відносну траєкторію переміщення судна відносно нерухомої цілі, розташованої в центрі лівої частини рисунка. Права частина рисунка містить траєкторії руху

судна та цілі в істинному русі. Судячи з відносної траєкторії, дистанція між судном та ціллю протягом усього маневру повернення збільшується.

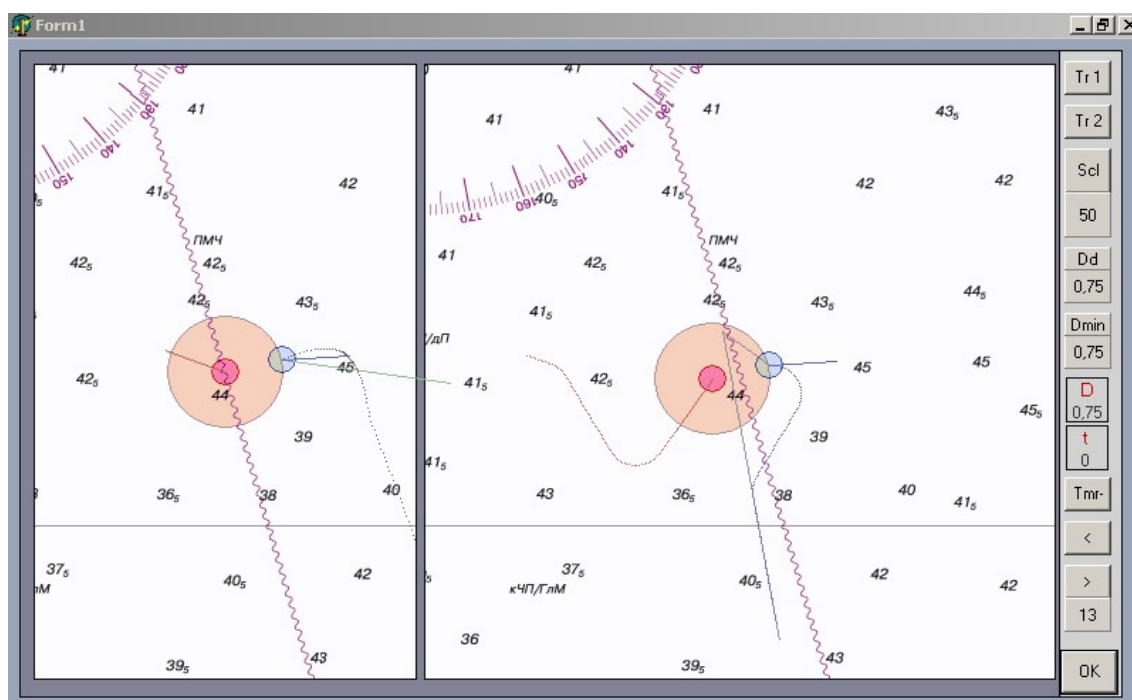


Рис. 4.8 – Ситуація з маневруючою ціллю

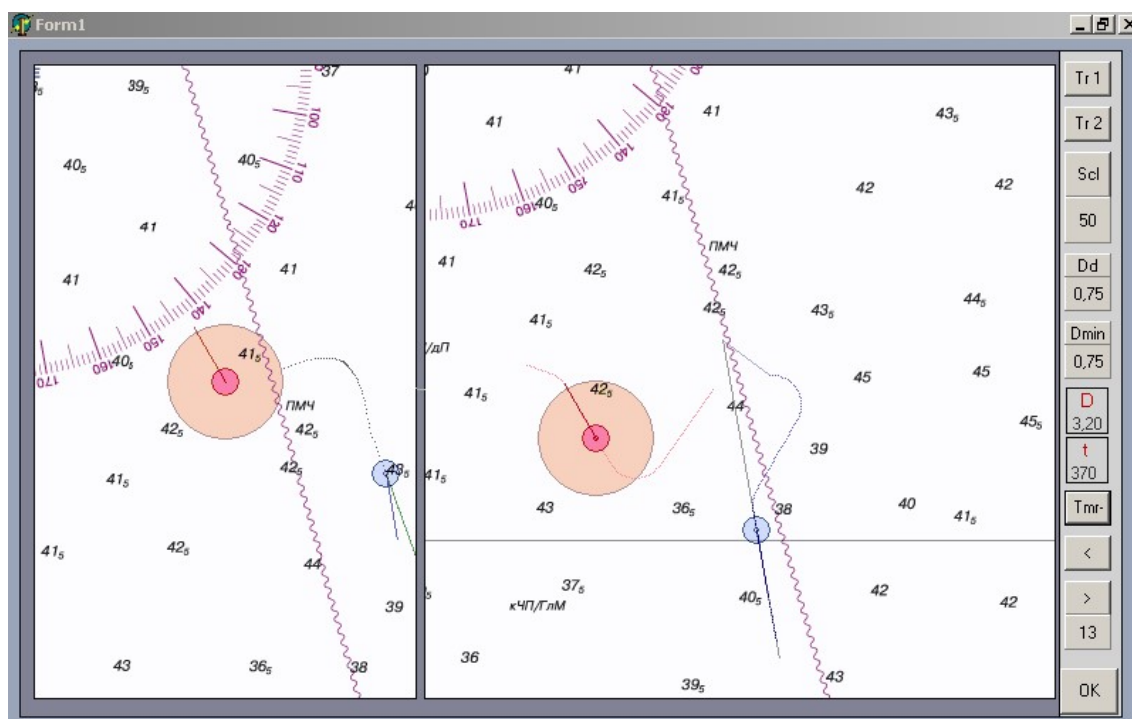


Рис. 4.9 – Виконання судном маневру виходу за умови маневруючої цілі

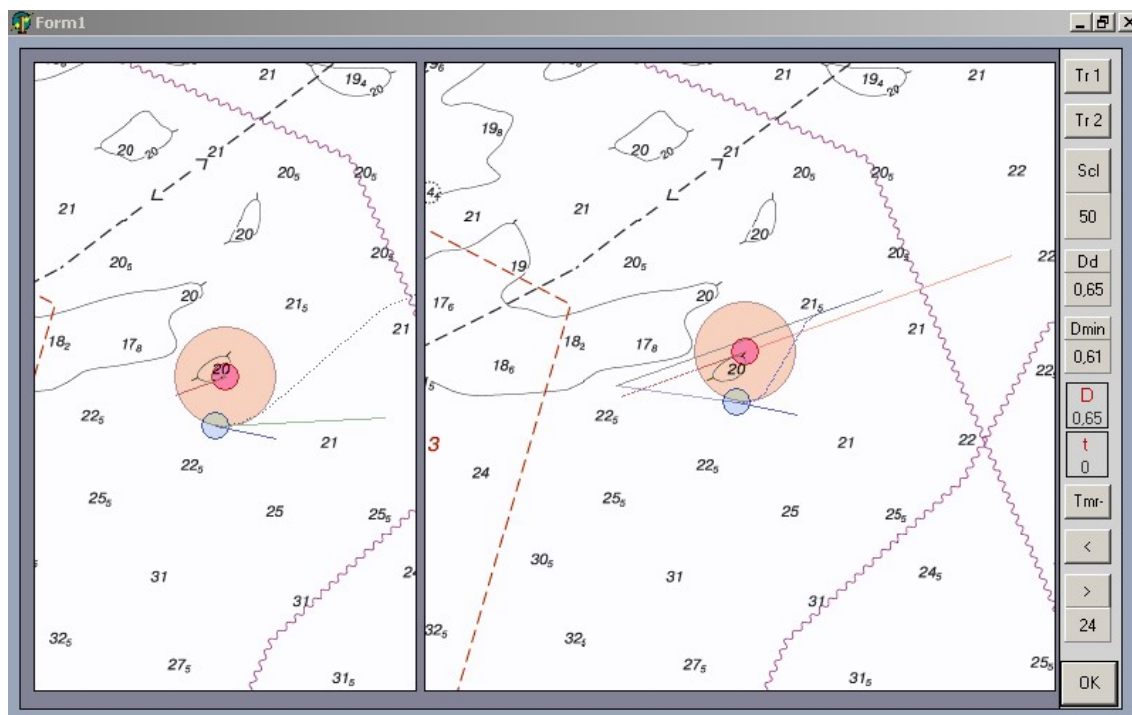


Рис. 4.10 – Безпечний маневр повернення судна траєкторією першого типу

На рис. 4.11 наведено ситуацію, коли допустимим є маневр повернення за допомогою траєкторії другого типу, оскільки траєкторія першого типу не гарантує безпеки маневру. У цьому випадку судно починає поворот у бік, протилежний програмній траєкторії, і розходить з ціллю в допустимій дистанції найкоротшого зближення.

Ситуація, коли допустимим є маневр повернення з допомогою траєкторії третього типу, показано на рис. 4.12. З рисунка випливає, що для безпечного розходження судно спочатку протягом деякого інтервалу часу рухається курсом ухилення, після чого робить поворот у бік програмної траєкторії руху.

Загалом було згенеровано понад 100 різних початкових ситуацій та розраховано параметри маневрів повернення на програмну траєкторію руху. Виявилося, що 51% маневрів мають перший тип траєкторії повернення, 37% другий тип і 12% третій тип. Усі вибрані програмою маневри виявилися безпечними.

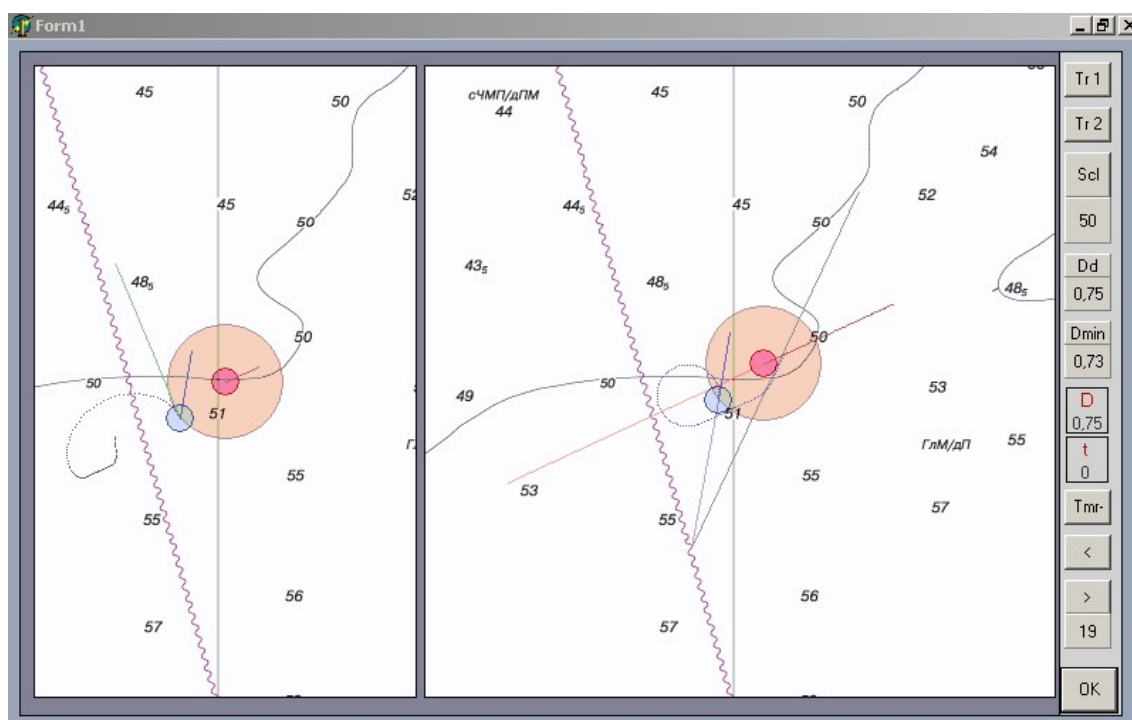


Рис. 4.11 – Безпечний маневр повернення судна траєкторією другого типу

У додатку А наведена інформація щодо частини маневрів (25-ти), імітація яких була проведена за допомогою комп'ютера. Параметри початкових ситуацій наведено у табл. 4.1.

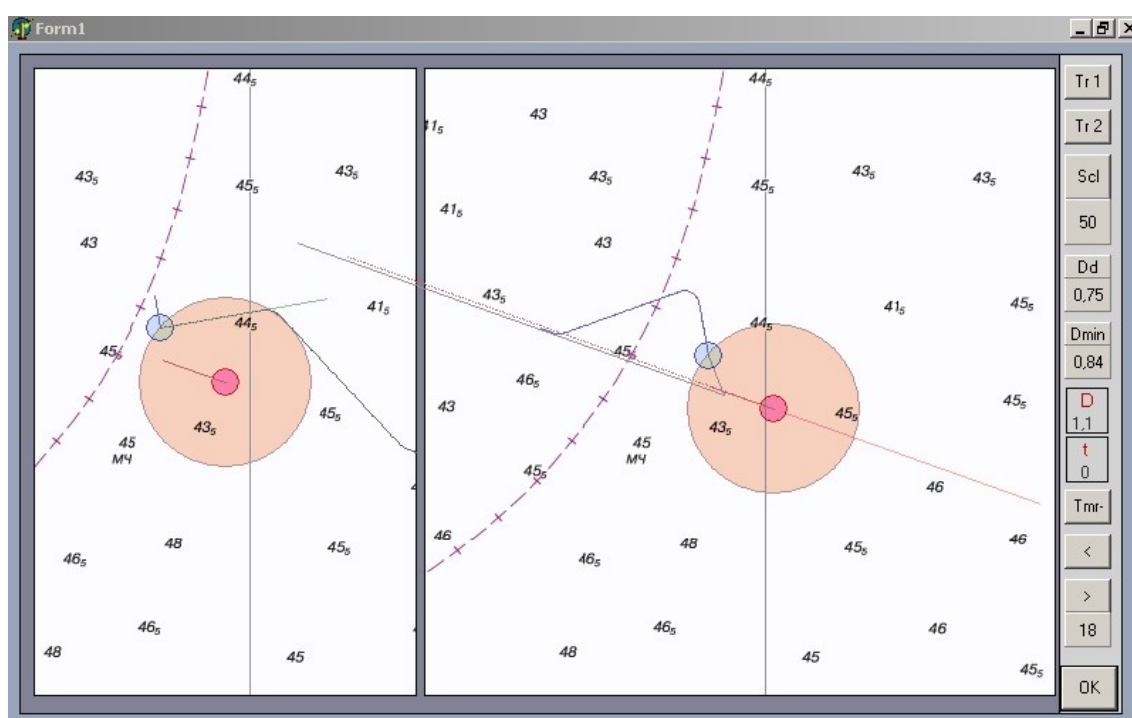


Рис. 4.12 – Безпечний маневр повернення судна траєкторією третього типу

У таблиці прийнято такі позначення:

$K_o$  – початковий курс судна;

$K_y$  – курс ухилення судна;

$V_o$  – швидкість судна;

$K_c$  – курс цілі;

$V_c$  – швидкість цілі

$\omega_o$  – кутова швидкість повороту судна;

$\omega_c$  – кутова швидкість повороту цілі;

$\alpha_o$  – початковий пеленг;

$L_o$  – початкова дистанція;

$L_d$  – гранично допустима дистанція;

$q_v$  – бік повороту судна;

$q_c$  – бік повороту цілі.

Таблиця 4.1

Параметри вихідних ситуацій

№ ситуац	$K_o$	$K_y$	$V_o$	$K_c$	$V_c$	$\omega_o$	$\omega_c$	$\alpha_o$	$L_o$	$L_d$	$q_v$	$q_c$
1	125	116	20	90	19	1	1	196	0,7	0,7	1	0
2	125	116	20	270	19	1	1	196	0,7	0,7	1	0
3	90	100	25	270	23	1	1	355	0,62	0,62	1	0
4	270	5	23	90	25	1	1	240	0,83	0,83	-1	0
5	180	186	24	90	23	1	1	167	1,22	0,75	-1	0
6	90	99	23	150	24	1	1	330	1,05	0,75	-1	0
7	290	309	23	245	24	1	1	275	0,75	0,75	-1	0
8	245	5	24	290	23	1	1	191	0,91	0,91	-1	0
9	325	338	23	215	24	1	1	277	0,60	0,60	-1	0
10	215	335	24	325	23	1	1	157	0,70	0,70	-1	0

Продовження табл. 4.1

№ ситуац	$K_o$	$K_y$	$V_o$	$K_c$	$V_c$	$\omega_o$	$\omega_c$	$\alpha_o$	$L_o$	$L_d$	$q_v$	$q_c$
11	170	64	24	290	23	1	1	257	0,75	0,75	1	0
12	290	270	23	170	24	1	1	90	0,75	0,75	1	0
13	170	87	24	90	23	1	1	257	0,75	0,75	1	1
14	40	160	24	190	23	1	1	347	0,77	0,77	-1	0
15	190	239	23	40	20	1	1	169	0,75	0,75	-1	0
16	275	283	24	275	12	1	1	206	0,75	0,75	-1	0
17	275	20	12	275	24	1	1	130	0,75	0,75	-1	0
18	290	350	12	290	24	1	1	130	1,1	0,75	-1	0
19	25	9	25	65	13	1	1	51	0,75	0,75	1	0
20	310	3	24	170	21	1	1	184	1,0	0,75	-1	0
21	171	115	21	310	24	1	1	170	1,07	0,75	1	0
22	40	35	24	125	21	1	1	345	1,00	0,75	1	-1
23	5	42	22	180	20	1	1	275	1,83	1,75	-1	-1
24	70	102	22	250	19	1	1	11	0,65	0,65	-1	0
25	30	48	24	30	10	1	1	351	0,75	0,65	-1	-1

Результати імітаційного моделювання 25 маневрів повернення судна на програмну траєкторію руху представлені в табл. 4.2. У ній для кожної ситуації наведено тип траєкторії, гранично допустима дистанція найкоротшого зближення.  $L_d$ , мінімальна дистанція  $L_{\min}$  в разі рекомендованого типу траєкторії повернення, мінімальна дистанція  $L_{\min 1}$  в разі іншого типу траєкторії повернення (перший тип, коли рекомендовано другий тип і другий тип, коли рекомендовано перший або третій тип), нормальна відстань до програмної траєкторії  $L_k$ , час маневрування  $t_{man}$  рекомендованим типом траєкторії повернення, час маневрування  $t_{man 1}$  в разі іншого типу траєкторії повернення.

Таблиця 4.2

## Результати імітаційного моделювання

№ ситуац	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип траєкт.	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2
$L_d$	0,70	0,70	0,62	0,83	0,75	0,75	0,75	0,91	0,60	0,70
$L_{\min}$	0,67	0,69	0,62	0,75	0,79	0,73	0,74	0,91	0,59	0,70
$L_{\min 1}$	0,18	0,69	0,62	0,18	1,13	0,57	0,74	0,64	0,59	0,49
$L_k$	0,719	0,719	0,604	0,458	0,531	0,845	1,514	0,627	0,517	0,696
$t_{man}$	550	250	185	340	165	250	430	250	175	265
$t_{man1}$	250	550	480	280	475	555	705	435	470	450
$L_d$	0,75	0,75	0,75	0,77	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
$L_{\min}$	0,75	0,75	0,75	0,77	0,69	0,74	0,63	0,84	0,73	1,00
$L_{\min 1}$	0,75	0,75	0,75	0,32	0,55	0,18	0,57	0,66	0,24	1,00
$L_k$	0,517	0,911	0,51	0,757	0,732	0,55	0,551	0,409	0,513	0,393
$t_{man}$	375	280	345	460	455	475	550	820	455	210
$t_{man1}$	260	555	340	280	195	175	395	445	170	360
№ ситуац	21	22	23	24	25					
Тип траєкт.	2	1	1	1	2					
$L_d$	0,75	0,75	1,75	0,65	0,65					
$L_{\min}$	0,89	0,75	1,83	0,61	0,74					
$L_{\min 1}$	0,47	0,27	1,30	0,63	0,25					
$L_k$	0,157	0,15	0,78	0,732	0,479					
$t_{man}$	305	110	265	270	420					
$t_{man1}$	175	355	475	500	140					

Аналіз табл. 4.2 показує, що імітаційна комп'ютерна програма, яка використовує алгоритм вибору маневру повернення на програмну траєкторію руху, отриманий у дисертації, у кожній ситуації обирає безпечну (допустиму) траєкторію повернення з урахуванням пріоритетів, встановлених на трьох її типах.

У деяких ситуаціях, наприклад 11-й і 13-й, перший і другий типи траєкторії є допустимими і час виконання маневру кожним типом траєкторії близький в обох випадках.

Загалом результати імітаційного моделювання підтверджують достовірність та коректність запропонованого методу вибору маневру повернення судна на програмну траєкторію руху.

#### Висновки із четвертого розділу дисертації

У розділі наведено алгоритм вибору маневру повернення судна на програмну траєкторію руху, який ідентифікує початкову ситуацію з однією з трьох підмножин, внаслідок чого визначається тип траєкторії повернення судна на програмну траєкторію руху та алгоритм розрахунку параметрів маневру.

Отримано аналітичні вирази розрахунку параметрів маневру для кожного з типів траєкторії повернення з урахуванням уточнення їх значень за найбільш адекватною динамічною моделлю руху судна на криволінійній траєкторії.

Для перевірки коректності та достовірності отриманих теоретичних результатів було виконано імітаційне моделювання маневру повернення судна на програмну траєкторію руху у різних ситуаціях та різними типами траєкторії повернення, результати якого наведено у розділі.

Моделювання здійснювалося за допомогою комп'ютерної програми, в якій використано аналітичні вирази та алгоритми, отримані в дисертації.

У розділі наведено опис імітаційної програми, яка є програмним продуктом, написаним мовою високого рівня. У табличному вигляді наведено відомості про 25 (зі 125) початкових ситуацій та результати щодо виходу судна

на програмну траєкторію руху, до основних параметрів яких відносяться тип траєкторії повернення, дистанція найкоротшого зближення, гранично допустима дистанція зближення та час, необхідний для реалізації маневру.

Загалом було згенеровано 125 різних початкових ситуацій та розраховано параметри маневрів повернення на програмну траєкторію руху. Виявилося, що 51% маневрів мають перший тип траєкторії повернення, 37% – другий тип і 12% – третій тип. Усі вибрані програмою маневри виявилися безпечними..

Основні результати розділу надруковані у роботах [140, 141].

## ВИСНОВКИ

1. Оцінювання стану питання. Однією з найактуальніших у судноводінні є проблема забезпечення безаварійного розходження суден у стиснених водах, якій присвячені роботи вчених різних країн світу. Численні дослідження, присвячені проблемі вибору безпечного маневру розходження суден, що небезпечно зближуються, в переважній більшості під маневром розходження мають на увазі тільки ухилення судна з програмної траєкторії руху, що забезпечує максимально безпечну дистанцію найкоротшого зближення. Подальше керування судном після завершення моменту найкоротшого зближення у таких роботах не обговорюється, вважаючи, що питання вибору подальшої траєкторії руху судна є тривіальним. У найпростішому випадку, коли ситуація небезпечного зближення виникає у відкритому морі за відсутності інших суден у районі можливого зіткнення, в разі вибору лише безпечного ухилення, а не оптимального маневру розходження, а також у випадку зближення суден на зустрічних курсах, можна вважати, що небезпека зіткнення існує лише на ділянці ухилення.

У загальному випадку загроза зіткнення найімовірніша під час плавання у стиснених водах, що характеризуються високою щільністю інтенсивності руху суден та наявністю численних навігаційних небезпек. У таких умовах плавання вихід на програмну траєкторію є частиною стратегії безпечного розходження суден. Більше того, навіть на вільній від заважаючих суден і навігаційних небезпек акваторії в разі небезпечного зближення суден на курсах, що перетинаються, і обгоні зіткнення можливі, як на ділянці ухилення, так і на ділянці повернення на програмну траєкторію руху.

У стратегію розходження крім ділянки ухилення судна із заданою траєкторією також включено ділянку повернення на неї, а розрахунок параметрів стратегії проводився з урахуванням обмежень на безпечну розходження для обох ділянок.

Проблемі вибору безпечного маневру виходу судна на програмну

траєкторію руху присвячено дисертаційну роботу та отримано рішення поставленого завдання.

2. Методи вирішення поставленої проблеми. За допомогою методів теорії систем було здійснено декомпозицію головного завдання дисертаційного дослідження на три незалежні складові окремі завдання, методи теорії ієрархічних багаторівневих систем та теорії координації були використані для розробки математичної моделі вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію руху за наявності та відсутності координації їх взаємодії; методи теорії керування застосовувалися у дослідженні впливу спільних маневрів повернення суден на програмні траєкторії руху та виборі безпечного маневру; методи теорії математичного програмування використовувалися для вибору оптимального оперативного керування виходом судна на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації; за допомогою методів синтезу моделей було розроблено імітаційну модель дисертаційного дослідження.

3. Формулювання вирішеного наукового завдання, його значення для науки і практики. В результаті вирішення головного наукового завдання розроблено спосіб розходження суден з урахуванням повернення їх на програмні траєкторії руху, який відрізняється тим, що використовується оперативне керування виходом судна на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації з урахуванням координації маневрування суден і без неї.

Наукову значимість роботи становлять вперше отриманий спосіб вибору безпечного маневру повернення судна на програмну траєкторію руху одним із трьох типів траєкторії з урахуванням початкової ситуації та поведінки цілі; вперше запропонований спосіб вибору спільного безпечного маневру повернення судна та цілі на програмні траєкторії руху з урахуванням координації їхньої взаємодії; вперше сформований метод оперативного керування судном під час виходу на програмну траєкторію руху за станом поточної ситуації.

Практична значимість вирішеного завдання полягає в тому, що отриманий у дисертації спосіб вибору безпечного маневру повернення суден на

програмну траєкторію може бути використаний не тільки для розходження суден, але й для керування іншими рухомими об'єктами у районах підвищеної інтенсивності руху.

4. Висновки й рекомендації щодо наукового та практичного використання отриманих результатів. Отримані в дисертації результати – алгоритми, програми та імітаційна модель – можуть бути впроваджені на суднах для вибору безпечного маневру повернення суден на програмну траєкторію в стиснених умовах плавання, в процесі проектування ЗАРП з функціями вибору оптимального маневру розходження та розробленні експертних систем розходження суден і підвищенні кваліфікації судноводіїв.

5. Якісні та кількісні показники отриманих результатів. Якісним показником є підвищення безпеки процесу розходження суден, а кількісний – зі 125 згенерованих різних початкових ситуацій та розрахованих їх параметрів маневрів повернення на програмну траєкторію руху 51% маневрів мають перший тип траєкторії повернення, 37% – другий тип і 12% – третій тип.

6. Обґрунтування достовірності отриманих результатів. Достовірність отриманих результатів дисертаційного дослідження підтверджено проведенням у роботі імітаційним моделюванням.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цаллагов Х.-Б. Н. Аналитические методы определения безопасных курсов и скоростей судов / Х.-Б. Н. Цаллагов // Теоретические вопросы построения АСУ крупнотоннажными транспортными судами. – М.: Наука, 1978. – С. 83-93.
2. Георгизон Е. Б. Сравнительный анализ алгоритмов расхождения судов / Е. Б. Георгизон, Х.-Б. Н. Цаллагов // Теоретические вопросы построения АСУ крупнотоннажными транспортными судами. – М.: Наука, 1978. – С. 93-101.
3. Цаллагов Х.-Б. Н. Безопасное расхождение судов при централизованном автоматизированном управлении / Х.-Б. Н. Цаллагов // Задачи автоматизации управления движением судов в районах интенсивного судоходства. – М.: Ин-т Проблем Управления, 1983. – С. 29-39.
4. Фрейдзон И. Р. Моделирование корабельных систем управления/ И. Р. Фрейдзон. – Л.: Судостроение, 1975. – 232 с.
5. Кудряшов В. Е. Разработка и исследование алгоритма управления движением судов для предотвращения столкновений в процессе расхождения с несколькими опасными объектами: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: 05.22.16 «Судовождение» / В. Е. Кудряшов. – Ленинград, 1976. – 23 с.
6. Кудряшов В. Е. Математическая модель процесса расхождения нескольких управляемых объектов/ В. Е. Кудряшов // Известия ЛЭТИ. – 1976. – № 206. – С. 15-19.
7. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами/ В. Е. Кудряшов // Судостроение. – 1978. – № 5. – С. 35-40.
8. Павлов В. В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления/ В. В. Павлов – Киев: Наукова думка, 1971. – 272 с.
9. Павлов В. В. Начала теории эргатических систем/ В. В. Павлов. – Киев: Наукова думка, 1975. – 240 с.

10. Павлов В. В. Проблемы построения многоцелевой эргатической системы предупреждения столкновений морских судов/ В. В. Павлов, В. Л. Баранов, И. А. Положенцев // Автоматика. – 1980. – № 2. – С. 73-76.

11. Положенцев И. А. Эргатическая дифференциально-игровая система предупреждения столкновения судов/ И. А. Положенцев // Кибернетика и вычислительная техника. – 1980. – № 50. – С. 38-41.

12. Положенцев И. А. Двухступенчатая система предотвращения столкновения судов/ И. А. Положенцев // Автоматика. – 1981. – № 3. – С. 73-76.

13. Богачук Ю. П. Эргатическая дифференциально – игровая система предотвращения столкновений судов/ Ю. П. Богачук, М. А. Положенцев // Дискретные и эргатические системы управления. – Киев: Ин-т кибернетики, 1983. – С. 98-105.

14. Богачук Ю. П. Эргатическая система управления групповым движением судов/ Ю. П. Богачук, И. А. Положенцев // Кибернетика и вычислительная техника. – 1984. – № 61. – С. 20-23.

15. Павлов В. В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов/ В. В. Павлов, Н. И. Сеньшин // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. – № 68. – С. 43-45.

16. Шепетуха Ю. М. Некоторые вопросы постановки задачи синтеза систем управления движением судна в условиях конфликта/ Ю. М. Шепетуха // Кибернетика и вычислительная техника. – 1984. – № 61. – С. 44-48.

17. Вычислительная система «Антикон» для предотвращения столкновений судов. А. с. 1136178. СССР. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. – 1985.

18. Павлов В. В. Экспериментальное исследование модели эргатической системы предотвращения столкновений судов / В. В. Павлов, Ю. М. Шепетуха: Препр. /АН Украины. Ин-т кибернетики; № 52. – К.: 1985. – 24 с.

19. Шепетуха Ю. М. К вопросу синтеза эргатической системы принятия решений о маневре безопасного расхождения судов / Ю. М. Шепетуха // Кибернетика и вычислительная техника. – 1989. – № 84. – С. 43-45.

20. Шепетуха Ю. М. Применение комбинированного маневра в эргатических системах разрешения навигационного конфликта / Ю. М. Шепетуха // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. – № 68. – С. 45-48.

21. Положенцев М. А. Применение двухэлементных стратегий расхождения в эргатических системах предупреждения столкновений судов / М. А. Положенцев, Ю. М. Шепетуха // Кибернетика и вычислительная техника. – 1987. – №76. – С. 19-21.

22. Поддубный В. В. Метод возможных направлений в задачах безопасного расхождения судов/ В. В. Поддубный, А. А. Куликов – М., 1987. – 21 с. – Деп. в ВИНТИ.

23. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов/ А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. – 1984. – № 12. – С. 22-24.

24. Цымбал Н. Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н. Н. Цымбал, И. А. Бурмака, Е. Е. Тюпиков. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

25. Пятаков Э. Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э. Н. Пятаков, Р. Ю. Бужбецкий, И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков. – Херсон: Гринь Д. С., 2015. – 312 с.

26. Бурмака И. А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И. А. Бурмака., Э. Н. Пятаков., А. Ю. Булгаков – LAP LAMBERT Academic Publishing, – Саарбрюккен (Германия), – 2016. – 585 с.

27. Вагущенко Л. Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л. Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.

28. Мальцев А. С. Учет маневренных характеристик для обеспечения безопасности плавания/ А. С. Мальцев. // Судостроение и ремонт. – 1989. – №5. – С. 29-31.

29. Мальцев А. С. Управление движением судна/ А. С. Мальцев. – Одесса: Весть, 1995. – 230 с.

30. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / А. С. Мальцев. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.

31. Мальцев А. С. Выбор оптимального курса для расхождения судов при криволинейном движении / А. С. Мальцев, Май Ба Линь // Судовождение. – №7. – 2004. – С. 47-57.

32. Якушев А. О. Имитационное моделирование процедуры выбора оптимальной формы судовой безопасной области / А. О. Якушев // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 25. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 – С. 172 – 178.

33. Бурмака И. А. Основные характеристики группы судов при внешнем управлении процессом судовождения/ И. А. Бурмака, Г. Е. Калиниченко, М. А. Кулаков // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 – С. 35-41.

34. Омельченко Т. Ю. Учет динамики судна при повороте/ Т. Ю. Омельченко // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 – С. 120 – 126.

35. Пятаков Э. Н. Определение областей взаимных обязанностей судов при опасном сближении/ Э. Н. Пятаков, С. В. Капанский // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 – С. 137-143.

36. Бурмака И. А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей / И. А. Бурмака // Судовождение: Сб. научн. Трудов ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 – С. 32 – 37.

37. Бужбецкий Р. Ю. Формализация взаимодействия судов при опасном сближении / Р. Ю. Бужбецкий // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 – С. 26-31.

38. Кулаков М. А. Процедура определения маневра расхождения изменением скоростей судов/ М. А. Кулаков // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 – С. 112-118.

39. Омельченко Т. Ю. Оценка минимальной допустимой дистанции сближения судов/ Т. Ю. Омельченко, К. С. Мартыненко // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017 – С. 137-142.

40. Петриченко Е. А. Имитационное моделирование процесса

расхождения судов в стесненных водах/ Е. А. Петриченко // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 – С. 143-148.

41. Пятаков Э. Н., Копанский С. В., Волков Е. Л. Координация безопасного расхождения трех судов/ Э. Н. Пятаков, С. В. Копанский, Е. Л. Волков // Судовождение: Сб. научн. трудов. ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017 – С. 185-193.

42. Алексишин А. В. Выбор курса уклонения судна с учетом закона распределения векториальной погрешности/ А. В. Алексишин, А. И. Бурмака, А. Р. Цагикян // Судовождение: Сб. научн. трудов. НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2018 – С. 10-15.

43. Бурмака И. А. Формализация области опасных курсов и скоростей судов при внешнем управлении их процессом расхождения/ И. А. Бурмака, С. С. Пасечнюк // Судовождение: Сб. научн. трудов. НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2018 – С. 16-23.

44. Кулаков М. О. Гибридная система управления взаимодействием судов в ситуации их опасного сближения / М. О. Кулаков, О. Ю. Козаченко, В. В. Степаненко // Судовождение: Сб. научн. трудов. НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017 – С. 103-108.

45. Омельченко Т. Ю. Формы истинной и относительной траекторий расхождения судов/ Т. Ю. Омельченко, В. В. Калюжный, А. В. Бородулин // Судовождение: Сб. научн. трудов. НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017 – С.109-119.

46. Петриченко Е. А. Разработка судовой информационной системы предупреждения столкновений / Е. А. Петриченко, О. А. Петриченко // Судовождение: Сб. научн. трудов. НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2018 – С. 120-130.

47. Пятаков Э. Н. Согласование маневров расхождения нескольких судов. / Э. Н. Пятаков, В. Э. Пятаков, К. Я. Станкевич // Судовождение: Сб. научн. трудов. НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2018 – С. 152-158.

48. Бурмака И. А. Методы внешнего управления судами в ситуации

опасного сближения/ И. А. Бурмака, М. А. Кулаков, Г. Е. Калиниченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2017. – № 2(17). – С. 4 – 14.

49. Пятаков Э. Н. Локально независимое управление процессом расхождения судов/ Э. Н. Пятаков, Т. Ю. Омельченко, Е. Л. Волков // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2017. – № 2(17). – С. 79 – 87.

50. Бурмака И. А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения/ И. А. Бурмака, Г. Е. Калиниченко, М. А. Кулаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – выпуск 3 (37). – С. 64 – 71.

51. Пятаков Э. Н. Синтез системы бинарной координации при расхождении судов / Э. Н. Пятаков, С. В. Копанский, Е. Л. Волков // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – выпуск 4 (38). – С. 23 – 29.

52. Бурмака И. А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов / И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. – С. 18 – 23.

53. Волков А. Н. Использование безопасной области судна сложной формы для обеспечения безаварийного плавания/ А. Н. Волков, А. О. Якушев // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. – С. 30 – 35.

54. Цымбал Н. Н. Выбор маневра расхождения изменением курса судна/ Н. Н. Цымбал, Э. Н. Пятаков // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. – С. 100 – 104.

55. Бурмака И. А. Выбор оптимального вектора управления судами изменением курсов для безопасного расхождения / И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса: ОНМА. – С. 29 – 33.

56. Якушев А. О. Выбор формы безопасной области, обеспечивающей минимальное отклонение судна при расхождении/ А. О. Якушев, Э. Н. Пятаков //

Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2015. – Вып. 21. Одесса: ОНМА. – С. 77 – 81.

57. Бурмака И. А. Выбор безопасного курса судна с учетом его инерционности/ И. А. Бурмака // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ "ОМА". – С. 17 – 21.

58. Копанский С. В. Графический способ оценки значения ситуационного возмущения / С. В. Копанский, Е. Л. Волков // Автоматизация судовых технических средств: науч. – техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ "ОМА". – С. 57 – 61.

59. Кулаков М. А. Использование областей опасных скоростей для выбора маневра расхождения судов/ М. А. Кулаков, Г. Е. Калиниченко, Е. А. Петриченко // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ "ОМА". – С. 62 – 65.

60. Пятаков Э. Н. Формирование системы бинарной координации судов с учетом закона необходимого разнообразия Эшби / Э. Н. Пятаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2016. – Вып. 22. Одесса: НУ "ОМА". – С. 75 – 78.

61. Бурмака И. А. Способ аналитического расчета оптимального маневра расхождения пары судов изменением скоростей / И. А. Бурмака // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 9-14.

62. Волков Е. Л. Оперативный способ предупреждения столкновения судов с помощью области недопустимых параметров движения / Е. Л. Волков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 21-24.

63. Калиниченко Г. Е. Формирование области опасных курсов судов с учетом их динамических характеристик / Г. Е. Калиниченко, С. С. Пасечнюк // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 44-50.

64. Кулаков М. А. Выбор оптимальных скоростей судов при внешнем

управлении их процессом расхождения / М. А. Кулаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 51-56.

65. Пятаков Э. Н. Формирование полной стратегии расхождения судов / Э. Н. Пятаков, Т. Ю. Омельченко // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. Одесса: НУ "ОМА". – С. 77-83.

66. Пятаков В. Э. Маневр расхождения судна с двумя опасными целями / В. Э. Пятаков, О. А. Петриченко, В. В. Калюжный // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2018. – Вып. 24. Одесса: НУ "ОМА". – С. 81-87.

67. Бородулин А. В. Определение предельно-допустимой дистанции сближения судов для доменов эллиптической и сложной формы / А. В. Бородулин // East European Scientific Journal, № 4 (44), 2019, part 1. – С. 37–42.

68. Бурмака А. И. Учет угловой скорости судна при расчете параметров маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака, А. Н. Волков // East European Scientific Journal, № 4 (44), 2019, part 1. – С. 19–23.

69. Петриченко Е. А. Сложный маневр выхода судна на программную траекторию после уклонения от опасной цели / Е. А. Петриченко, В. В. Калюжный // East European Scientific Journal, № 4 (44), 2019, part 1. – С. 31–36.

70. Пятаков Э. Н. Формализация ситуации опасного сближения судов / Э. Н. Пятаков // East European Scientific Journal, № 2 (42), 2019, part 1. – С. 4 – 9.

71. Бурмака И. А. Маневр последовательного расхождения с двумя целями изменением курса и пассивным торможением / И. А. Бурмака, Э. Н. Пятаков // East European Scientific Journal, № 5 (33), 2018, part 1. – С. 19 – 24.

72. Пасечнюк С. С. Использование маневра снижения скорости одного из судов при внешнем управлении процессом расхождения / С. С. Пасечнюк // East European Scientific Journal, № 5 (33), 2018, part 1. – С. 25 – 29.

73. Бурмака И. А. Применение областей недопустимых значений параметров для предупреждения столкновений судов при их внешнем управлении / И. А. Бурмака, М. А. Кулаков, С. С. Пасечнюк // East European Scientific Journal, № 11 (27), 2017, part 1. – С. 40 – 47.

74. Омельченко Т. Ю. Отображение траектории расхождения судна уклонением вправо в множество форм относительных траекторий / Т. Ю. Омельченко, Э. Н. Пятаков, Е. Е. Тюпиков // East European Scientific Journal, № 11 (27), 2017, part 1. – С. 58-69.

75. Волков А. Н. Формирование процесса расхождения судна в ситуации опасного сближения методом виртуальных областей / А. Н. Волков, А. Ю. Булгаков, А. А. Голиков // East European Scientific Journal, № 11 (27), 2017, part 1. – С. 4-13.

76. Волков Е. Л. Использование областей недопустимых значений параметров движения судна при локально – независимом управлении процессом расхождения / Е. Л. Волков // East European Scientific Journal, № 11 (27), 2017, part 1. – С. 14 – 23.

77. Бородулин А. В. Область недопустимых значений курсов судов при использовании домена прямоугольной формы / А. В. Бородулин // Austria – science, Issue: 26, 2019. – С. 15-21.

78. Бурмака А. И. Формы относительных траекторий расхождения при уклонении судна влево / А. И. Бурмака, Т. Ю. Омельченко // Austria – science, Issue: 26, 2019. – С. 22-27.

79. Петриченко О. А. Использование областей недопустимых параметров расхождения для предотвращения столкновения судов / О. А. Петриченко // Austria – science, Issue: 26, 2019. – С. 28-34.

80. Пятаков В. Э. Имитационное моделирование процесса расхождения судна с двумя целями / В. Э. Пятаков // Austria – science, Issue: 26, 2019. – С. 35-42.

81. Бурмака И. А. Определение предельно-допустимой дистанции сближения при эллиптической форме судового домена / И. А. Бурмака // Austria –

science, Issue: 23, 2019. – С. 36-42.

82. Петриченко О. А. Способ оперативного определения параметров маневра расхождения судна / О. А. Петриченко, Н. Н. Цымбал // Austria – science, Issue: 23, 2019. – С. 48-53.

83. Пятаков Э. Н. Учет линейной навигационной опасности при выборе маневра расхождения судна / Э. Н. Пятаков // Austria – science, Issue: 23, 2019. – С. 43-47.

84. Бурмака И. А. Учет инерционно-тормозных характеристик при выборе маневра расхождения изменением скоростей судов / И. А. Бурмака // Austria – science, Issue: 16, 2018. – С. 34-37.

85. Пасечнюк С. С. Учет инерционных характеристик судов при формировании области недопустимых значений параметров их движения / С. С. Пасечнюк // Austria – science, Issue: 16, 2018. – С. 38-43.

86. Пятаков Э. Н. Способ расхождения судна с двумя опасными целями последовательными уклонениями / Э. Н. Пятаков, В. Э. Пятаков, О. А. Петриченко // Austria – science, Issue: 16, 2018.- С. 44-48.

87. Бурмака И. А. Применение областей недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения / И. А. Бурмака, Э. Н. Пятаков // Austria – science, Issue: 11, 2018. – С. 34-38.

88. Бурмака И. А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / И. А. Бурмака, Г. Е. Калиниченко, М. А. Кулаков // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017. – С. 56 – 60.

89. Пятаков Э. Н. Выбор стратегии расхождения при локально-независимом управлении судов в ситуации опасного сближения / Э. Н. Пятаков, С. С. Пасечнюк, Т. Ю. Омельченко // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017. – С. 78 – 81.

90. Волков А. Н. Использование виртуальных областей при плавании судна в стесненных водах / А. Н. Волков, А. А. Голиков, А. Ю. Булгаков // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14),

Issue: 132, 2017. – С. 56 – 60.

91. Волков Е. Л. Выбор маневра расхождения судна изменением курса с помощью области недопустимых параметров движения / Е. Л. Волков // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017. – С. 97 – 101.

92. Бурмака И. А. Выбор стратегии расхождения группы судов методами внешнего управления/ И. А. Бурмака // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017. – С. 66 – 70.

93. Калиниченко Г. Е. Учет инерционности судна при формировании области опасных курсов / Г. Е. Калиниченко // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017. – С. 71 – 74.

94. Омельченко Т. Ю. Взаимосвязь форм истинной и относительной траекторий расхождения / Т. Ю. Омельченко // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017. – С. 82 – 84.

95. Пятаков Э. Н. Особенности расчета параметров маневра уклонения при локально-независимом управлении процессом расхождения судов / Э. Н. Пятаков // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017. – С. 90 – 93.

96. Волков Е. Л. Маневр расхождения судна снижением скорости активным торможением / Е. Л. Волков // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017. – С. 98 – 101.

97. Бурмака И. А. Выбор совместной стратегии расхождения судов изменением параметров движения при их внешнем управлении. / И. А. Бурмака, С. С. Пасечнюк // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI (18), Issue: 158, 2018. – С. 41- 46.

98. Пятаков Э. Н. Способ определения безопасного маневра расхождения судна изменением курса в ситуации опасного сближения с двумя целями/ Э. Н. Пятаков, В. Э. Пятаков, Т. Ю. Омельченко // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(18), Issue: 158, 2018. – С. 72 – 75.

99. Cannell W. P. Collision avoidance as a game of coordination /

W. P. Cannell // The Journal of Navigation. – 1981. – 34, № 2. – P. 220 – 239.

100. Corlet A. G. Automation of collision avoidance at sea with special referens to, the international regulations for preventing collisions at sea / A. G. Corlet // "Ship. Operat. Automat." Amsterdam-Oxford. – 1975. – P. 93 – 100.

101. Piattelly M. On the automatic determination of an optimal anticollision strategy/ M. Piattelly, A. Tiano // "Ship. Operat. Automat." Amsterdam – Oxford. – 1975. – P. 106 – 114.

102. Scheffel B. Überlegungen zum Kollisionsschutz auf See. Linksdrehende Peilung und kooperative Ausweichmanöver zwischen Schiffen/ B. Scheffel // Hansa. – 1987. – 124, № 12. – P. 775 – 778.

103. Hilgert Helmut. "Manöver des Kurchaltors" und "Manöver des letzten Augenblicks" / Hilgert Helmut, Zopf Peter // Seewirtschaft. – 1989. – 21, № 11. – P. 536 – 539.

104. Hilgert Helmut. Die kritische Distanz in der Nebelfahrt / Hilgert Helmut // Hansa.- 1988.- 125, № 15 – 16. – P. 54 – 59.

105. Schlenk A. Zur optimalen Steuerung eines Schiffes in Kollisionssituationen unter Berücksichtigung des dynamischen Manörierungsverhaltens des Eigenschiffes / A. Schlenk, H. Ruttler // Schiffbauzeitung.- 1988. – 27, № 2. – P. 87 – 99.

106. Lisovski I. A. Differential Game Model of Ship Control Process / I. A. Lisovski // Link. Sei. and Appl. Automat. Contr. – Helsinki. – 1978, – Vol.2. – P.1557-1603.

107. Discussion on new approach on collision avoidance. Sindel Domil. Ship Oper. Autom. III Proc. 3rd IFIP/IFAC Symp., Tokyo. – November 26- 29. – 1979. – Amsterdam e. a. – 1980. – P. 191-197.

108. Karmarkar I. S. A multi – threat avoidance manoeuvre generator. / I. S. Karmarkar, R. Vargus // "Ocean's 80. Int. Forum Ocean Eng.", Seattle, Wash, 1980, New York, 1979. – P. 187 – 192.

109. Yongqing L. Wuhan ligong daxue xuebao. Jiaotong kexue yu gongcheng ban/ L. Yongqing // J. Wuhan Univ. Technol. Transp. Sci. and Eng. 2004. 28, №5, p. 752-754.

110. Hung Iran Viet. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Hung Iran Viet, Hagiwara Hideki, Tamaru Hitoi. // J. Jap. Inst. Navig. 2007. 117, P. 35—42.

111. Xu X. Modeling of Ship Collision Risk Index Based on Complex Plane and Its Realization/ X. Xu, X. Geng, Y. Q. Wen //TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 2, 2016, page 251-256.

112. Kao Sheng-Long. A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service / Kao Sheng-Long, Lee Kuo-Tien, Chang Ki-Yin, Ko Min-Der// J. Navig., 2007. 60, № 1, p. 17-31.

113. Sorge K. Die Theorie der optimalen Steuerung als Grundlage für die Modellierung von Prozessen in Schiffes / K. Sorge // Ingenierhochsch, Seefahrt, Warnomünde-Wustrow. – 1987. – 14, № 3. – P. 85 – 88.

114. Lamb W. G. P. The simulation of crossing maneuvers at sea / W. G. P. Lamb // The Journal of Navigation. – 1979. – 32, № 2. – P. 272 – 275.

115. De Wit C. Optimal collision avoidance in unconfined waters / De Wit C., Oppe Z. // Navigation (USA) . – 1979 – 80. – 26, № 4. – P. 296 – 303.

116. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation/ J. Lisowski // Advances in Safety and Reliability. – 2005. – Vol. 2. – London-Singapore, Balkema Publishers. – P. 1285-1292.

117. Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea/ J. Lisowski // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety. – 2005. – Gdańsk. – P. 71-78.

118. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system/ J. Lisowski // The Archives of Transport. – 2005. – No 3-4, Vol. XVII. – P. 133-147.

119. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.

120. Lisowski J. Game Strategies of Ship in the Collision Situations/ J. Lisowski // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 8, № 1, 2014, page 69-77.

121. Kimura Masafumi. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Kimura Masafumi, Suzuki Saburo // J. Jap. Inst. Navig. 2005. 112, P. 43-48.
122. Lisowski J. Analysis of Methods of Determining the Safe Ship Trajectory/ J. Lisowski// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 10, № 2, 2016, page 376-381.
123. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/ Liu Yu-hong, Hu Shen-ping // Navig. China. 2005, №4, p. 40-45.
124. Lisowski J. Safety of navigation based – mathematical models of game ship control/ J. Lisowski // Journal of Shanghai Maritime University. – 2004. – No 104, Vol. 25. – P. 65 – 74.
125. Kim D. Ship Collision Avoidance by Distributed Tabu Search/ D. Kim, K. Hirayama, T. Okimoto // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 1, page 23-29, 2015.
126. Hornauer S. Trajectory Planning with Negotiation for Maritime Collision Avoidance / S. Hornauer, A. Hahn, M. Blaich, J. Reuter // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 3, 2015, page 335-341.
127. Ганношина І.М., Калініченко Т.В., Нікітін П.В. Дослідження методів прогнозування руху, пошуку та супроводження морських об'єктів. *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – № 2(36). – 2022. – С. 135-149. doi: doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.11  
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/237>
128. Бурмака И. А. Теория и методы внешнего оптимального управления судов в ситуации опасного сближения: монография/ И. А. Бурмака. – Одесса: НУ «ОМА», 2019 – 335 с.
129. Петриченко О. А. Оперативный способ определения параметров маневра расхождения судна. / О. А. Петриченко // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018. – С. 68-73.
130. Петросян Л. А. Дифференциальные игры преследования / Л. А. Петросян – Л.: Изд. ЛГУ, 1977. – 222 с.

131. Петросян Л. А. Динамические игры и их приложения / Л. А. Петросян, Г. В. Томский – Л.: Изд. ЛГУ, 1982. – 252 с.

132. Tsymbal M. Development of simulator systems for preventing collision of ships / M. Tsymbal, I. Urbansky // The International Marine Simulator Forum – IMSF 8<sup>th</sup> to 12<sup>th</sup> September 2008. – 35<sup>th</sup> Annual General Meeting (AGM) and International Workshop Conference at Department of Maritime Studies of Hochschule Wismar and Maritime Simulation Centre Wamemünde (MSCW), Rostock- Wamemünde / Germany. – 10 P.

133. Степаненко В. В. К вопросу отображения ситуации расхождения судов / В. В. Степаненко // Судовождение. – № 4. – 2002. – С. 101 – 106.

134. Kalinichenko T., Kalinichenko Y., Tymoshchuk O. Account of navigational hazards when the ship and the target are avoiding collision at small distances. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*. – 2022. – С. 35-37. <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2022.002665>  
<https://journal.eu-jr.eu/ttfpits/article/view/2665>

135. Kalinichenko T., Tymoshchuk O., Tomchakovsky G. Maneuver of returning the vessel to the set track after passing the target. *Науково-технічний збірник «Судноводіння / Shipping & Navigation»*. – 2022. – Вип. 34. – С. 59-65. doi: 10.31653/2306-5761.34.2023.59-65 [https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023\\_T.-Kalinichenko-O.-Tymoshchuk-G.-Tomchakovsky-Maneuver-of-returning-the-vessel-to-the-set-track-after-passing-the-target.pdf](https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023_T.-Kalinichenko-O.-Tymoshchuk-G.-Tomchakovsky-Maneuver-of-returning-the-vessel-to-the-set-track-after-passing-the-target.pdf).

136. Kalinichenko T. Characteristics of the divergence of vessels at small initial distances. *European Science, Scientific research in modern conditions of instability*. –1(sge24-01). – 2023. – С. 92–135. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-24-01-015>  
<https://desymp.promonograph.org/index.php/sge/article/view/sge24-01-015>.

137. Калініченко Т.В. Урахування судна, що заважає, під час розходження судна з судном-ціллю на малих відстанях. *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – № 1(37). – 2023. – С. 79-85. doi: doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.08  
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/255>.

138. Калініченко Т.В. Вибір маневра повернення судна на програмну траєкторію руху без координації з ціллю. *Вісник Одеського національного*

*морського університету*. – Вип. 70. – 2023. – С. 47-57. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-47-57> <http://visnyk.onmu.org.ua/index.php/1/article/view/164>.

139. Калініченко Т.В. Розробка методу оперативного управління судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації. *Вісник Одеського національного морського університету*. – Вип. 73. – 2024. – С. 155-169. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2024-2-155-169>  
<http://visnyk.onmu.org.ua/index.php/1/article/view/216>.

140. Калініченко Т.В. Комп'ютерне моделювання безпечного повернення суден на програмні траєкторії руху. *Наука і техніка сьогодні*. – №11 (25). – 2023. – С. 670-677 [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-11\(25\)-670-677](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-11(25)-670-677)  
<http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/6605>

141. Калініченко Т.В. Основні напрямки підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнення суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. – Вип. 48. – 2024. – С. 178-183. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310709>  
[https://journals.urau.ua/vestnikpgtu\\_tech/article/view/310709](https://journals.urau.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/310709).

## **ДОДАТКИ**

## ДОДАТОК А

РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИБОРУ МАНЕВРА  
ПОВЕРНЕННЯ СУДНА НА ПРОГРАМНУ ТРАЄКТОРІЮ РУХУ

У додатку наведено ілюстрації щодо 25-ти ситуацій виходу судна на програмну траєкторію руху, які є результатами імітаційного моделювання та підтверджують коректність розробленого в дисертації способу. За кожною ситуацією наведено два рисунки: початкова ситуація та рекомендована траєкторія маневру виходу на програмну траєкторію, а також проміжна ситуація реалізації маневру виходу у певний момент часу. Параметри початкових ситуацій наведено у табл. 5.1 п'ятого розділу.

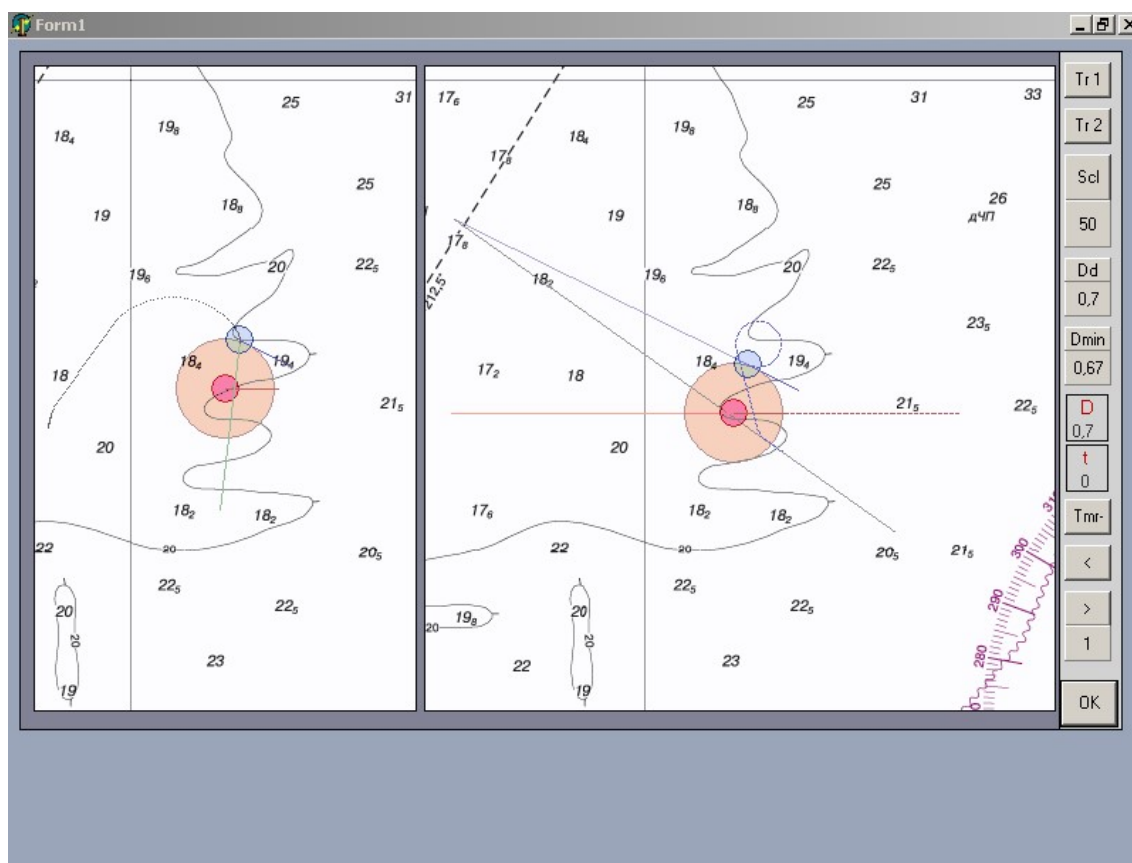


Рис. А1 – Початкова ситуація 1 та рекомендований другий тип траєкторії

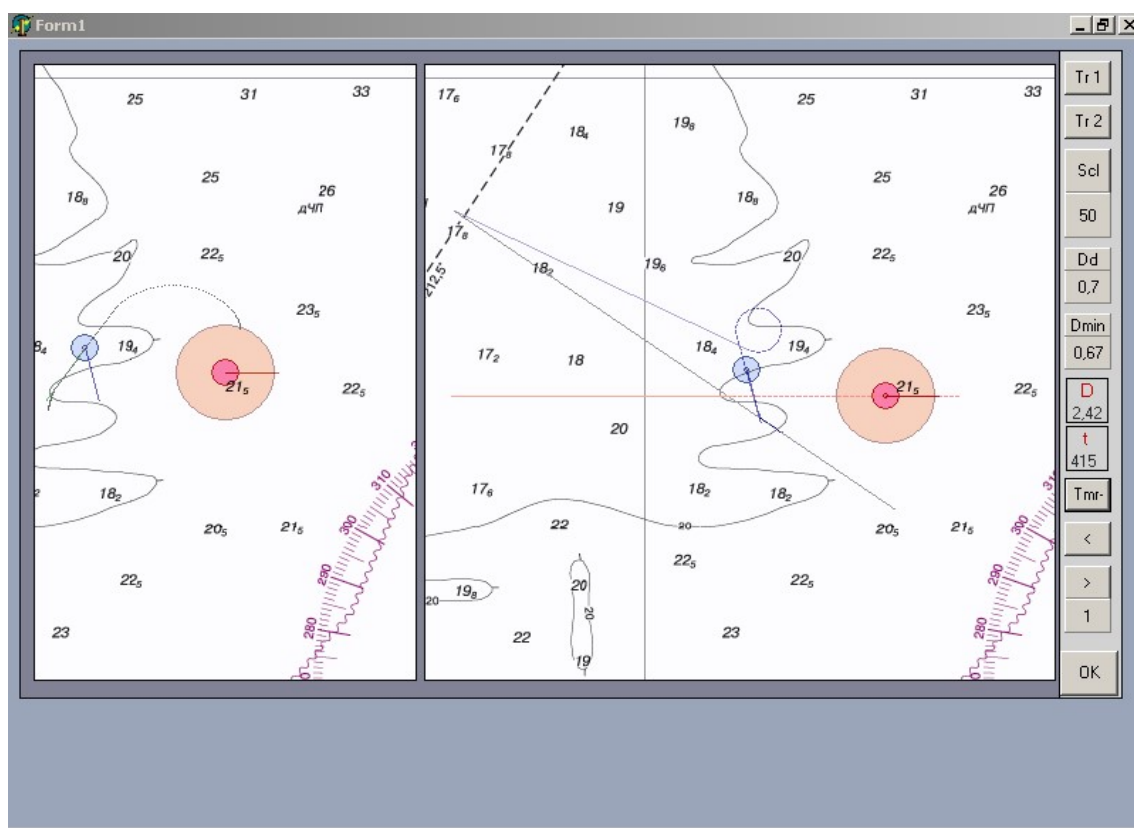


Рис. А2 – Ситуація 1 за  $t = 415$  с

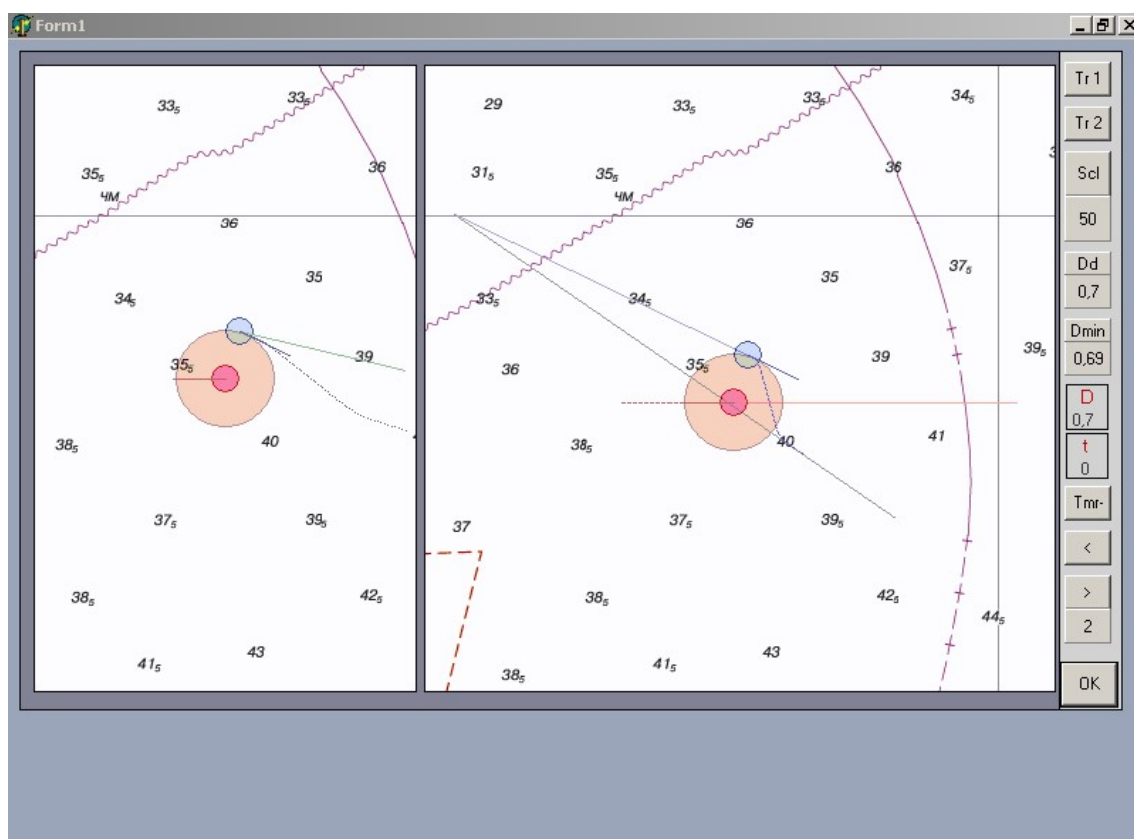


Рис. А3 – Початкова ситуація 2 та рекомендований перший тип траєкторії

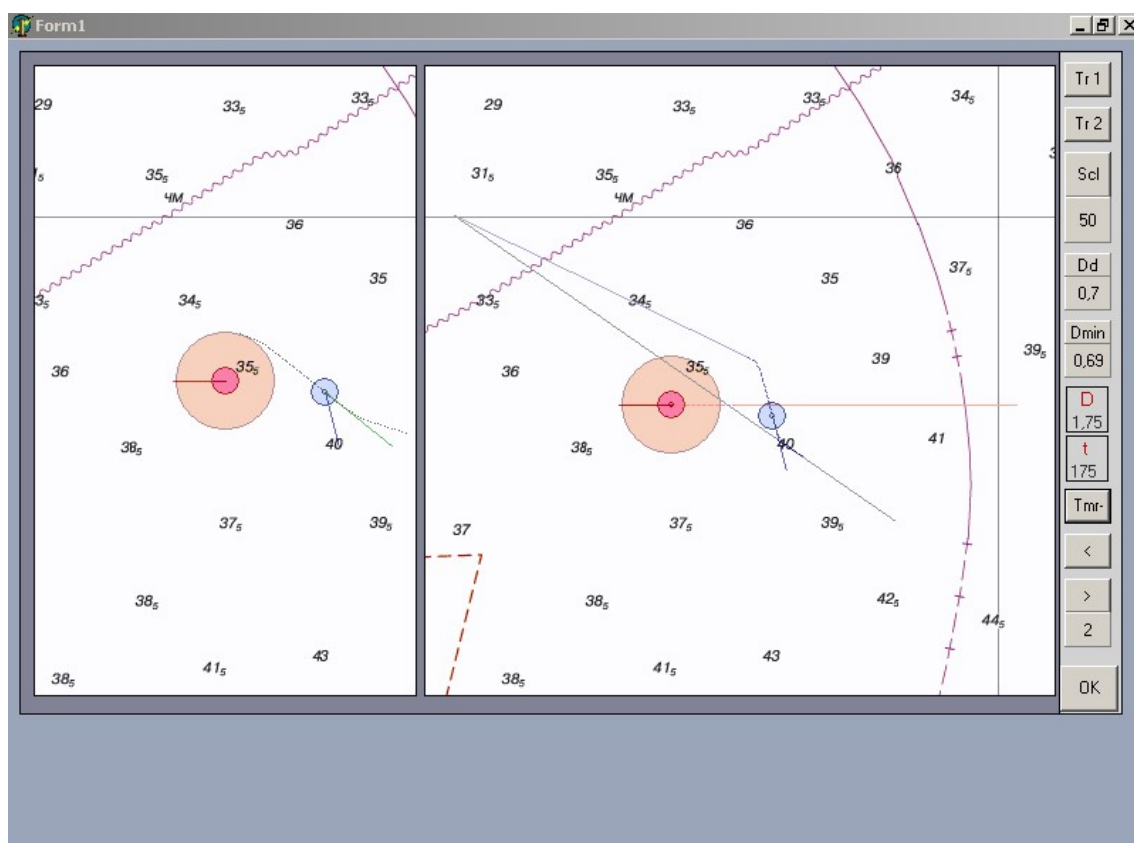
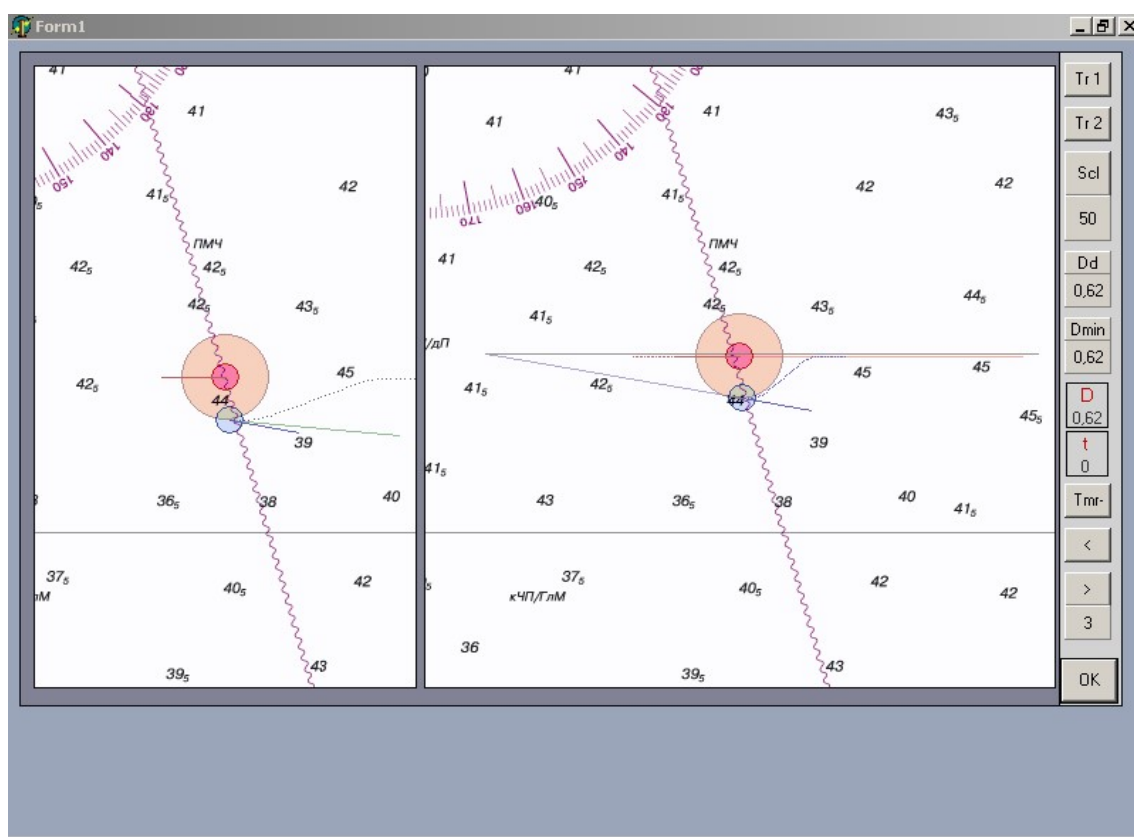
Рис. А4 – Ситуація 2 за  $t = 175$  с

Рис. А5 – Початкова ситуація 3 та рекомендований перший тип траєкторії

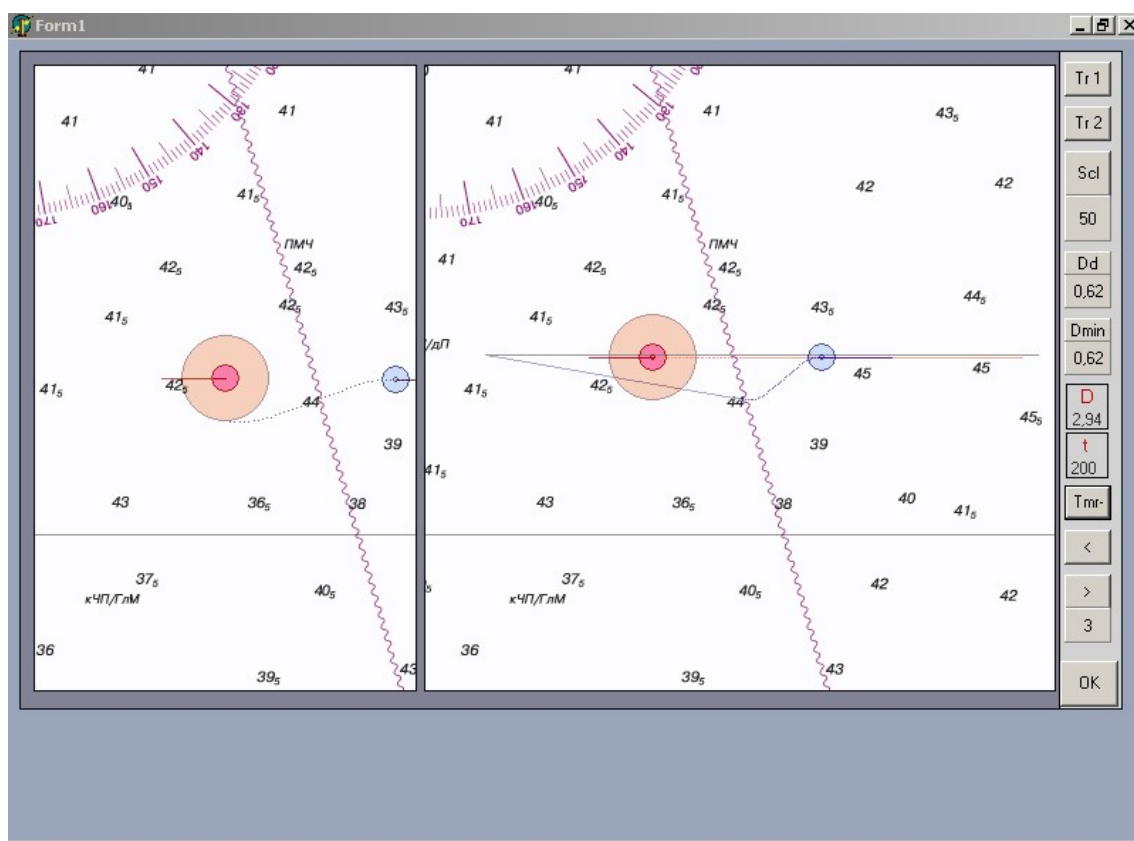
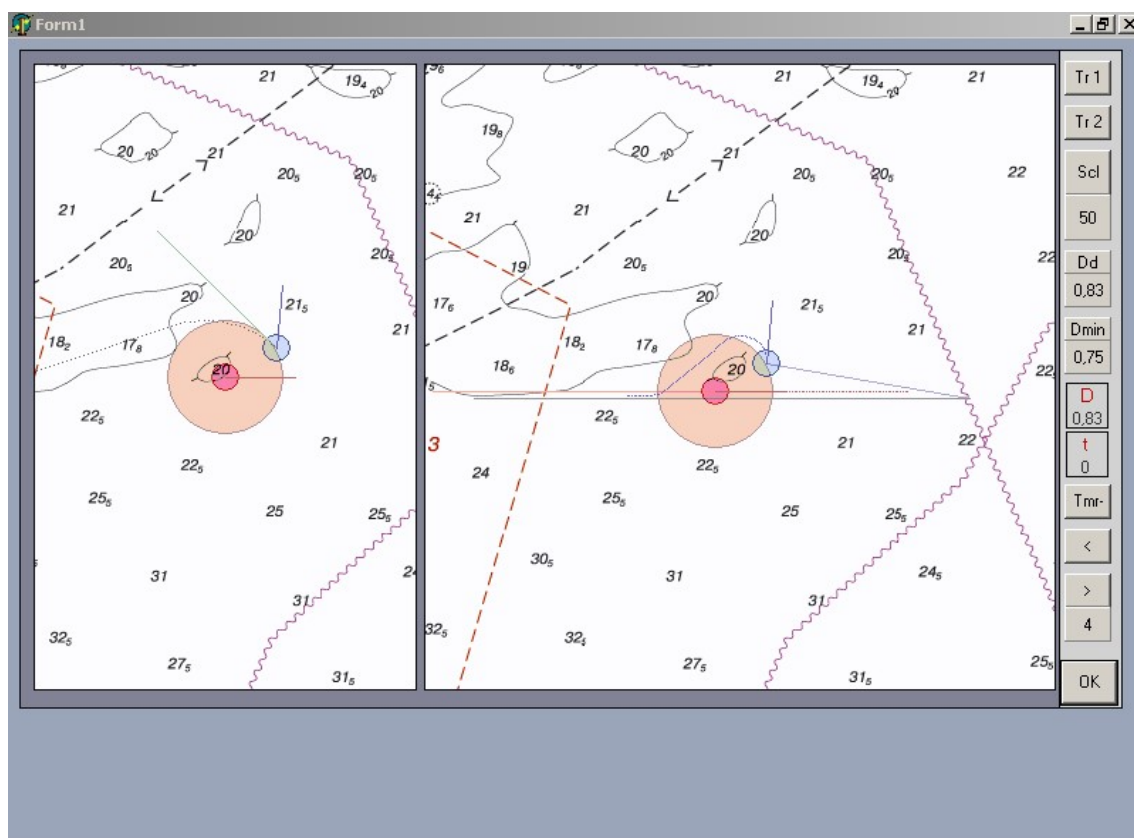
Рис. А6 – Ситуація 3 за  $t = 200$  с

Рис. А7 – Початкова ситуація 4 та рекомендований перший тип траєкторії

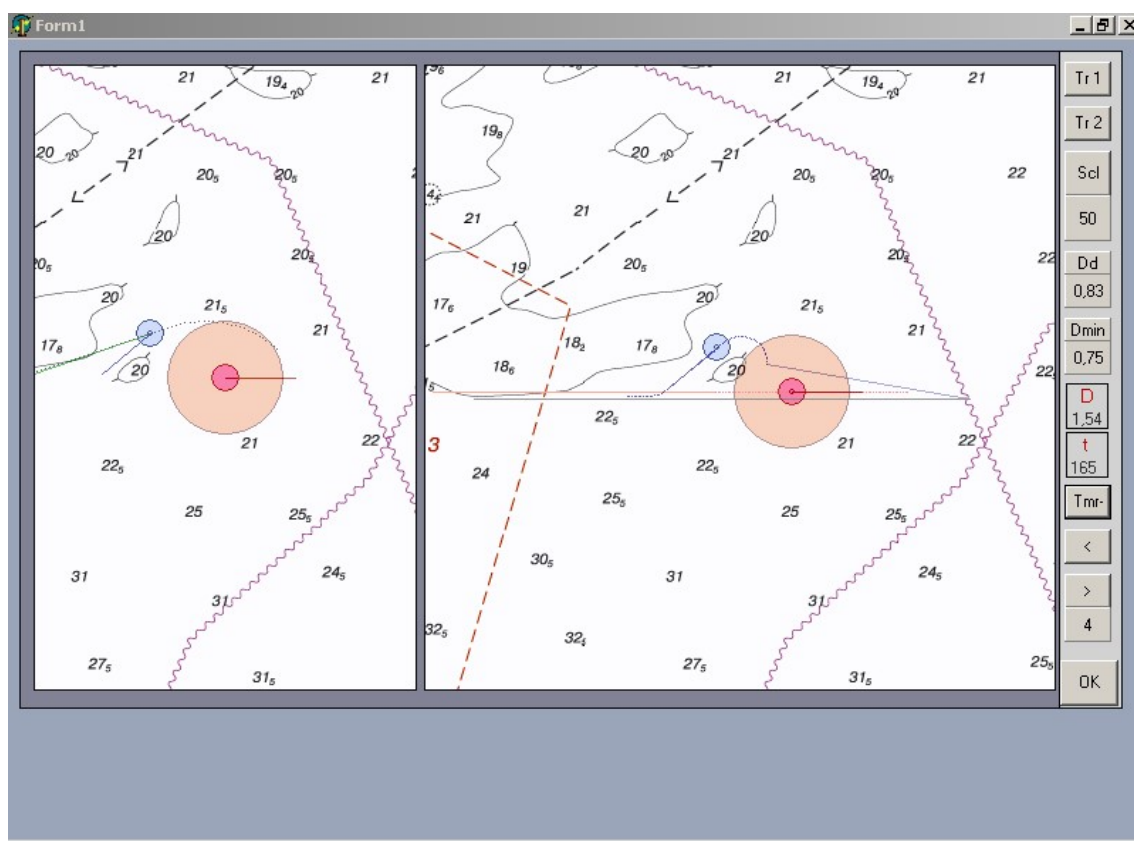
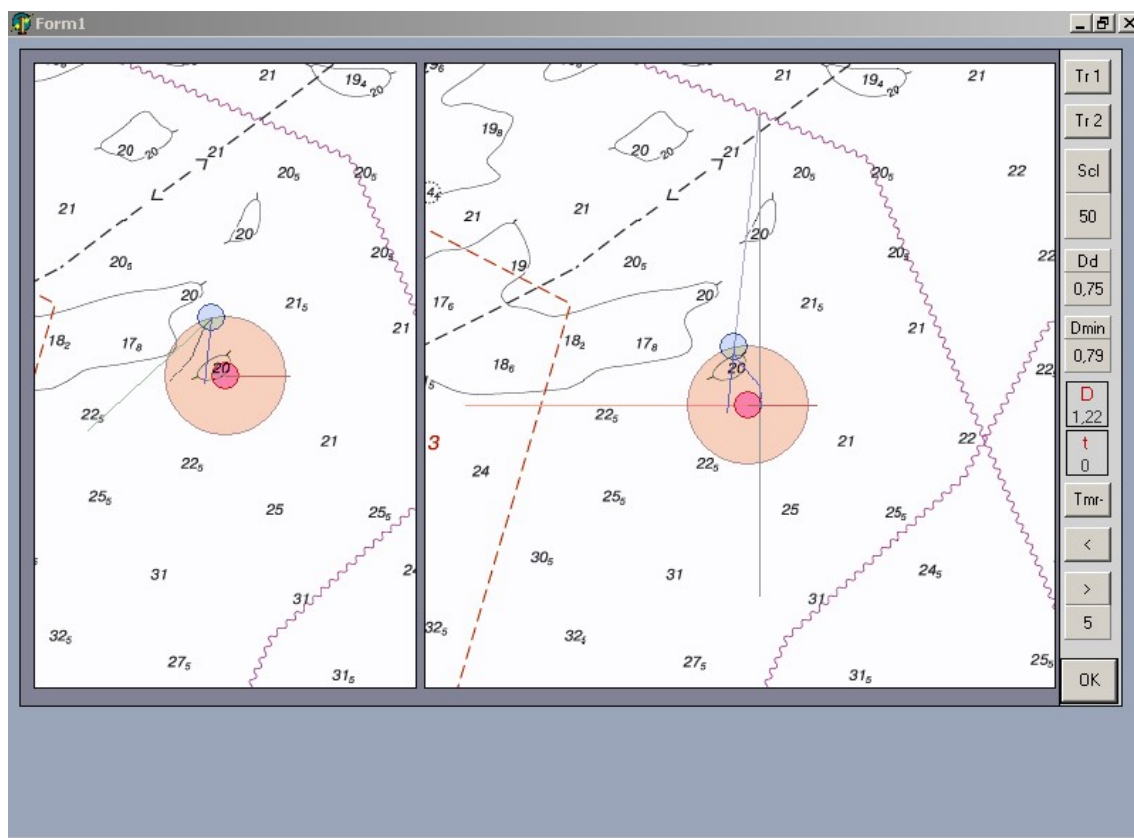
Рис. А8 – Ситуація 4 за  $t = 165$  с

Рис. А9. Початкова ситуація 5 та рекомендований перший тип траєкторії

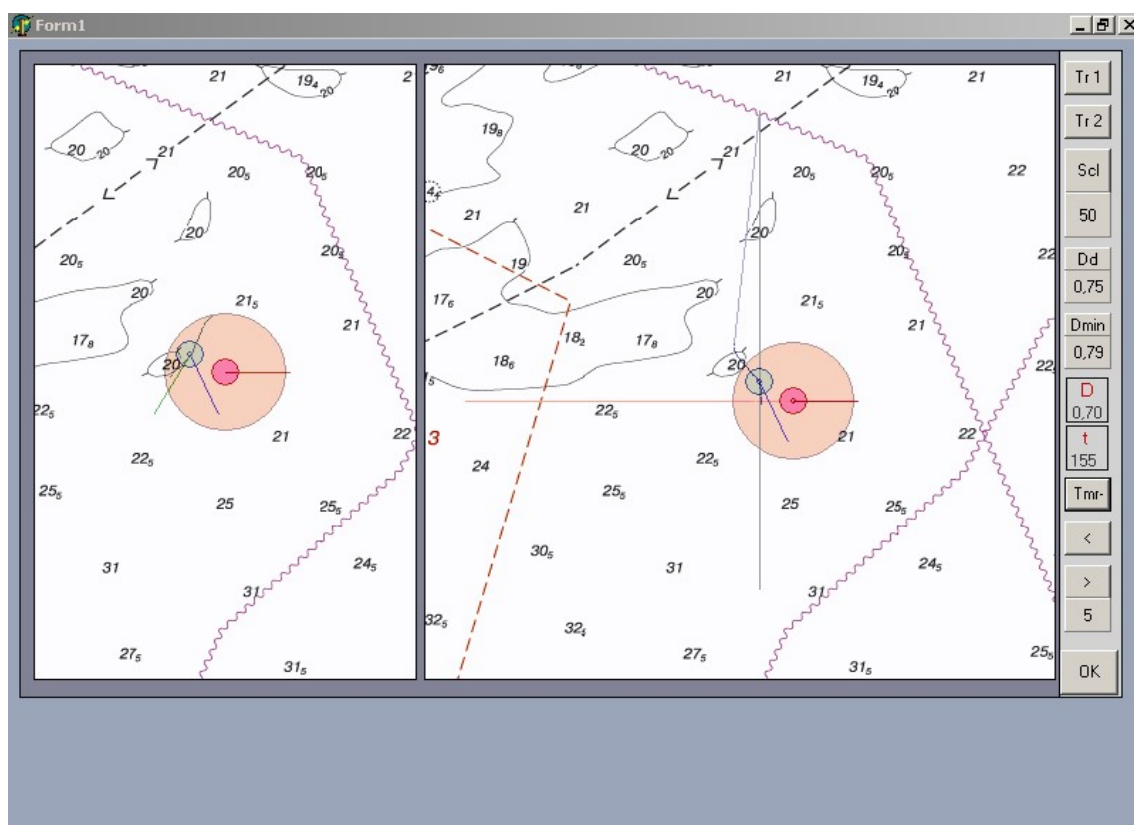
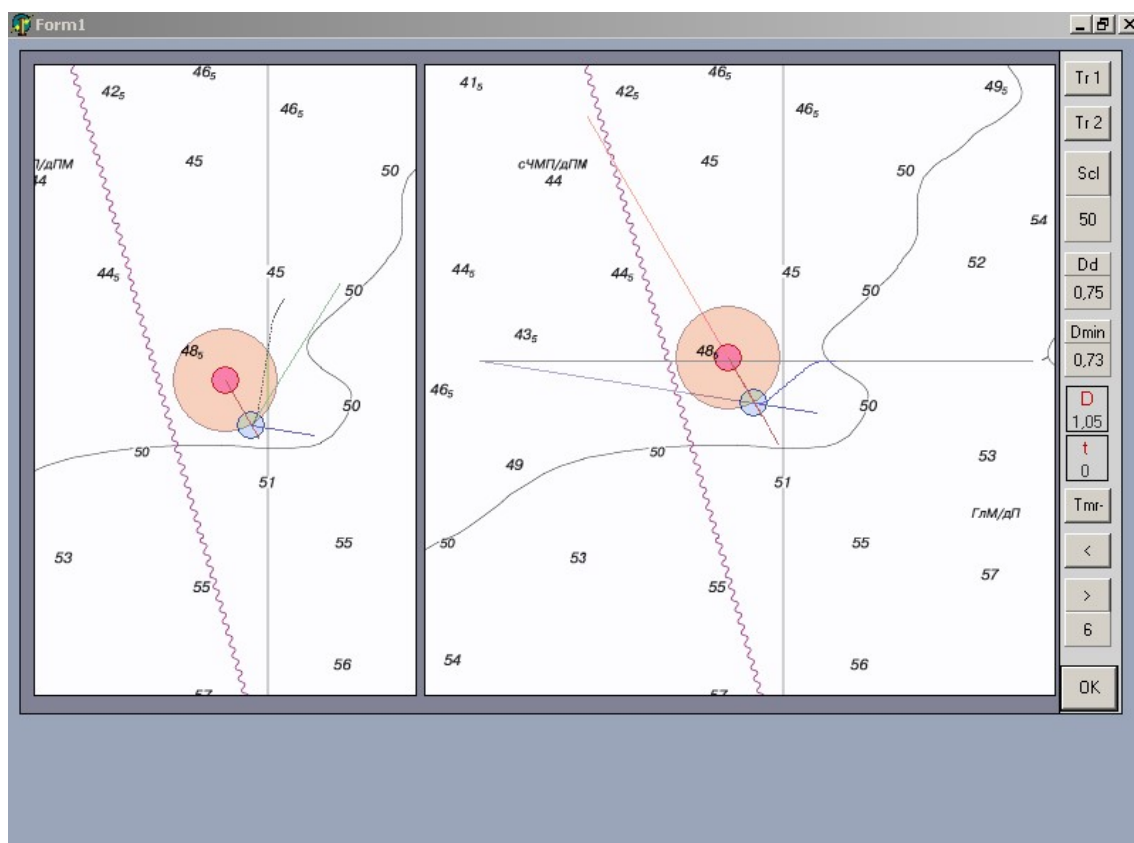
Рис. А10 – Ситуація 5 за  $t = 155$  с

Рис. А11 – Початкова ситуація 6 та рекомендований перший тип траєкторії

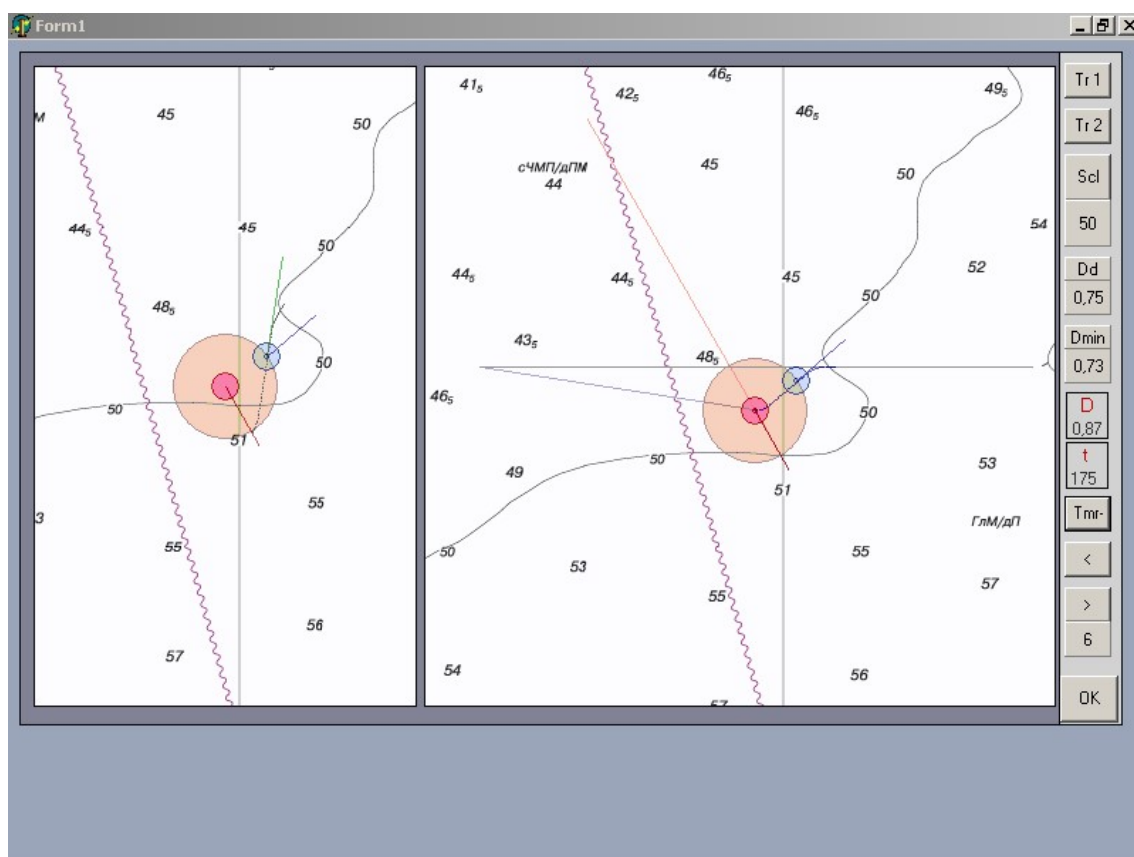
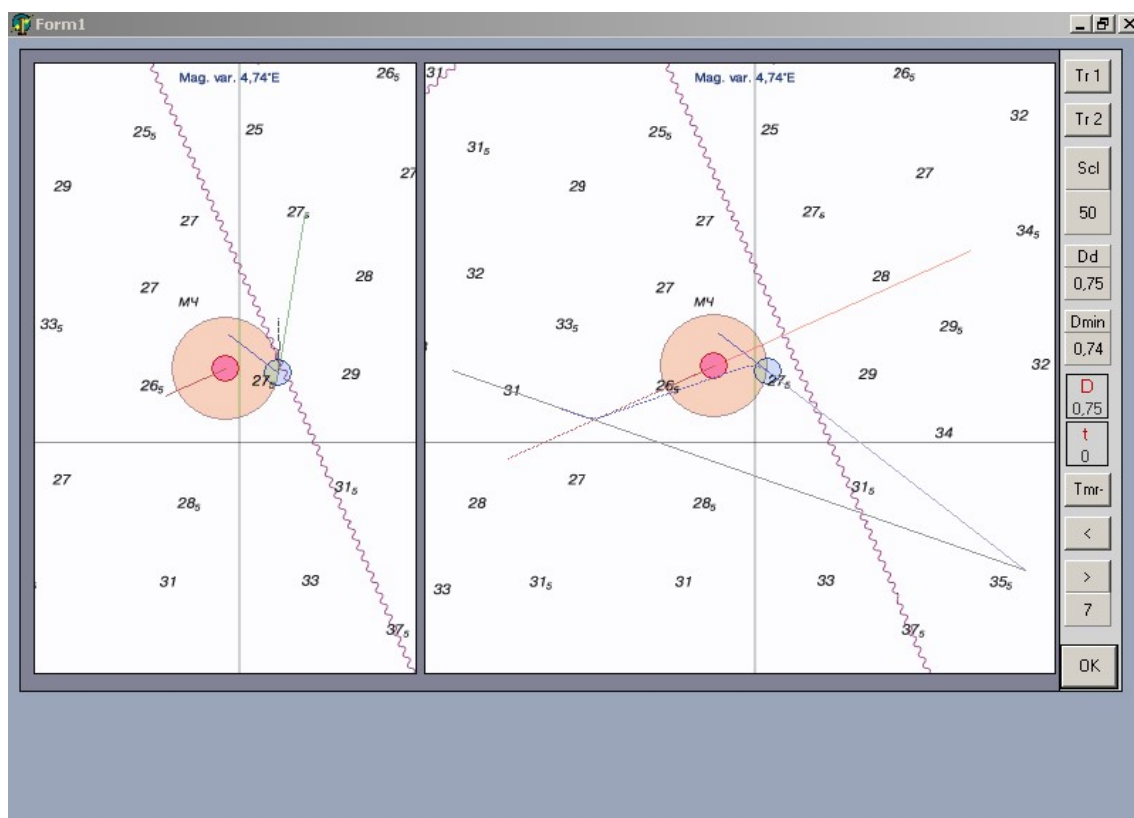
Рис. А12 – Ситуація 6 за  $t = 175$  с

Рис. А13 – Початкова ситуація 7 та рекомендований перший тип траєкторії

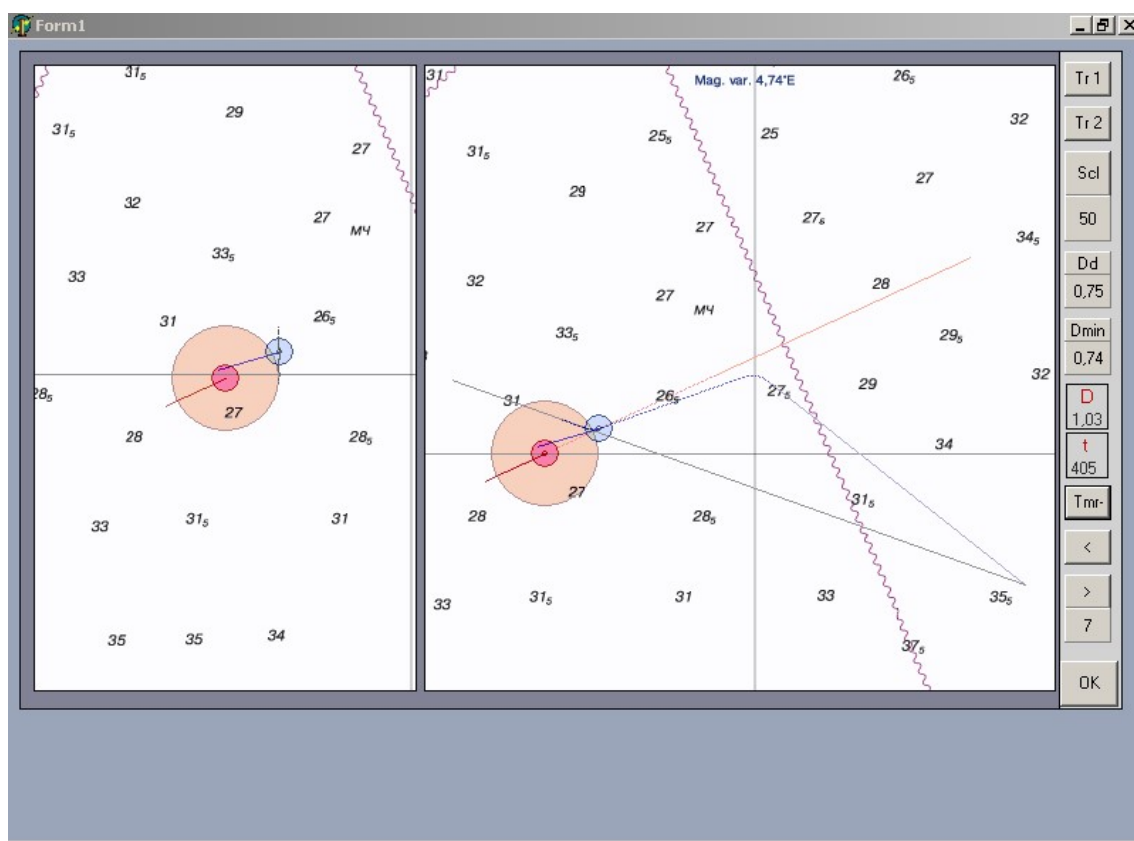
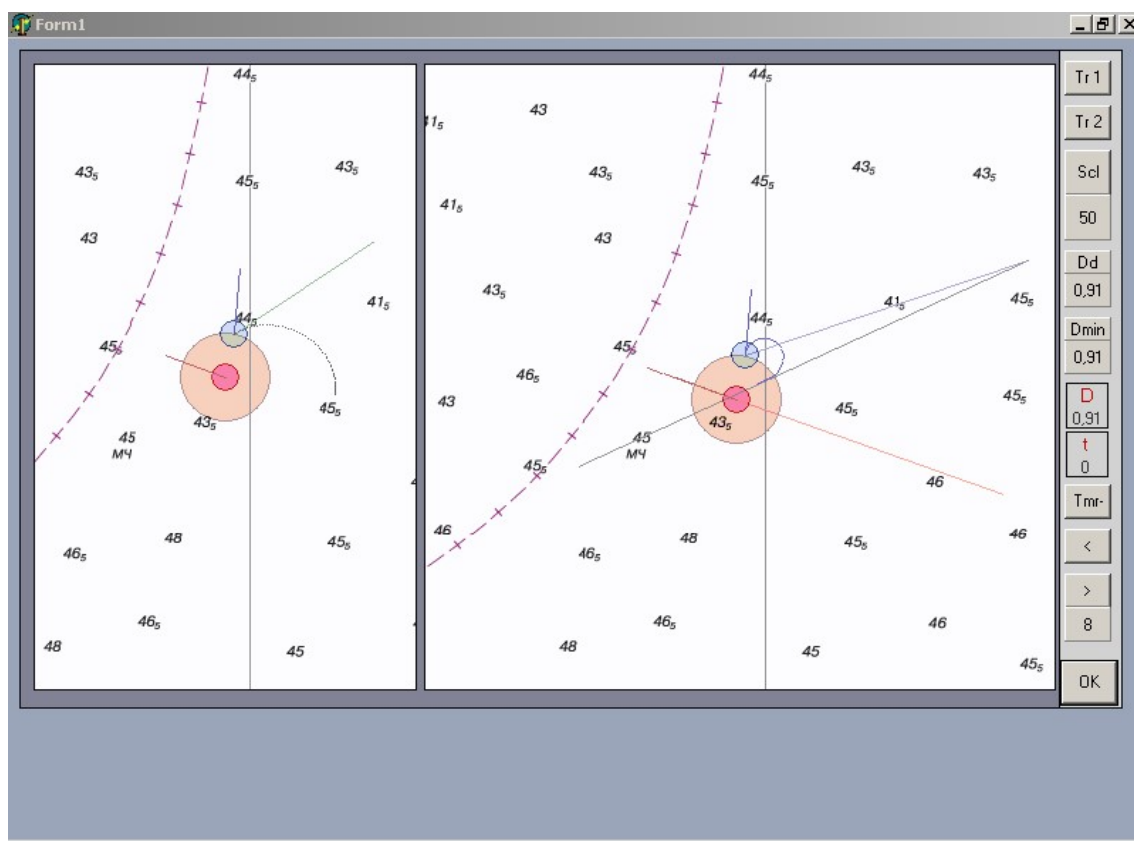
Рис. А14 – Ситуація 7 за  $t = 405$  с

Рис. А15 – Початкова ситуація 8 та рекомендований другий тип траєкторії



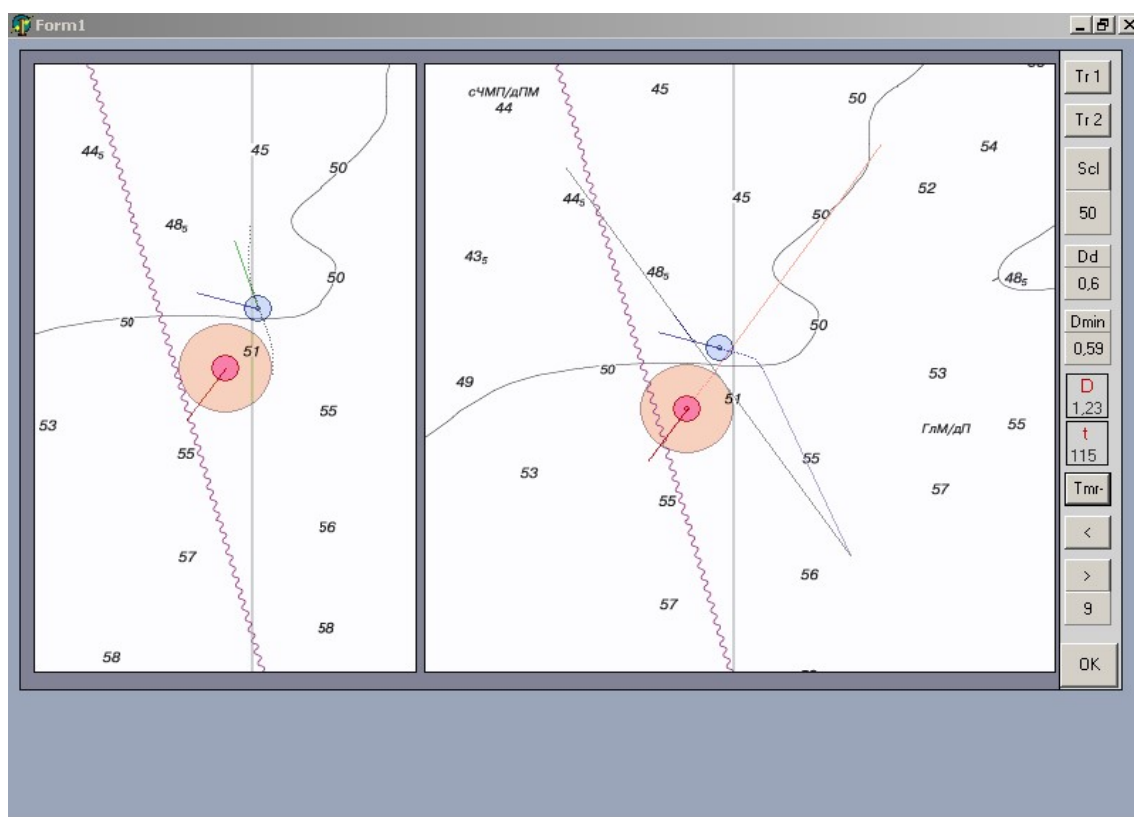
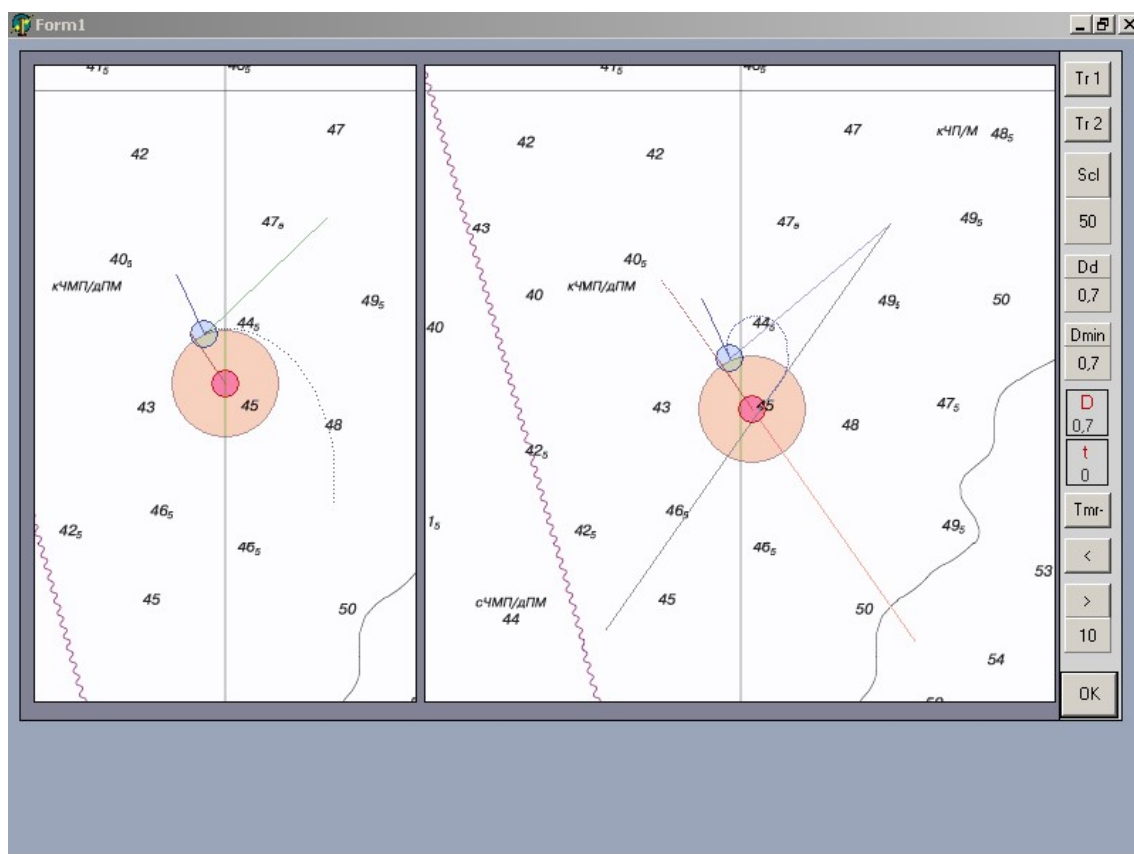
Рис. А18 – Ситуація 9 за  $t = 115$  с

Рис. А19 – Початкова ситуація 10 та рекомендований перший тип траєкторії

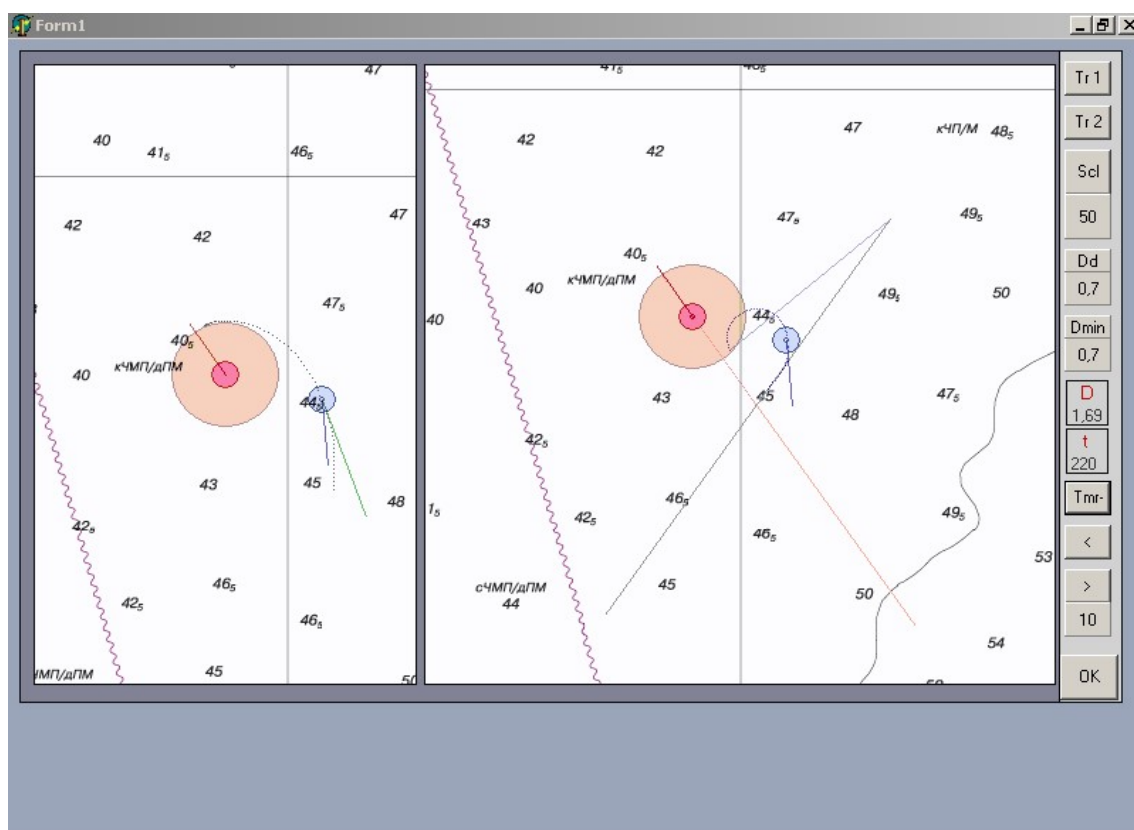
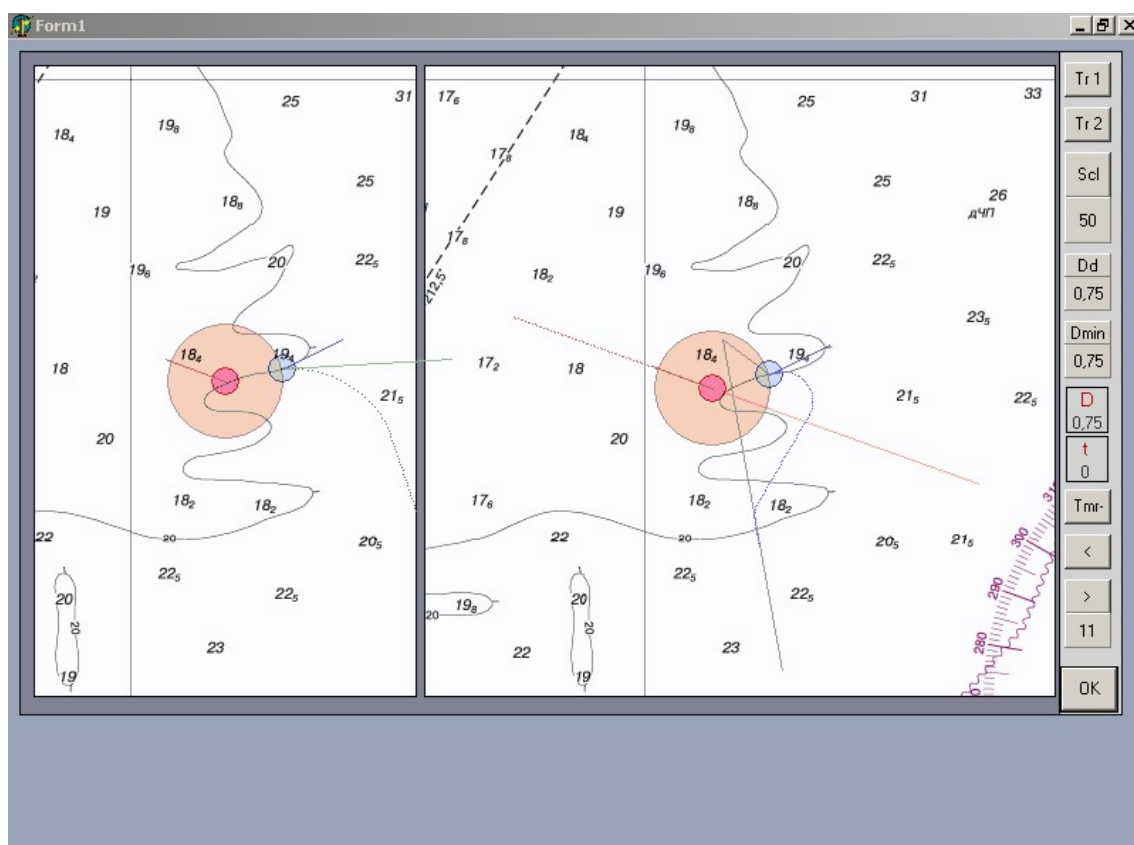
Рис. А20 – Ситуація 10 за  $t = 220$  с

Рис. А21 – Початкова ситуація 11 та рекомендований перший тип траєкторії

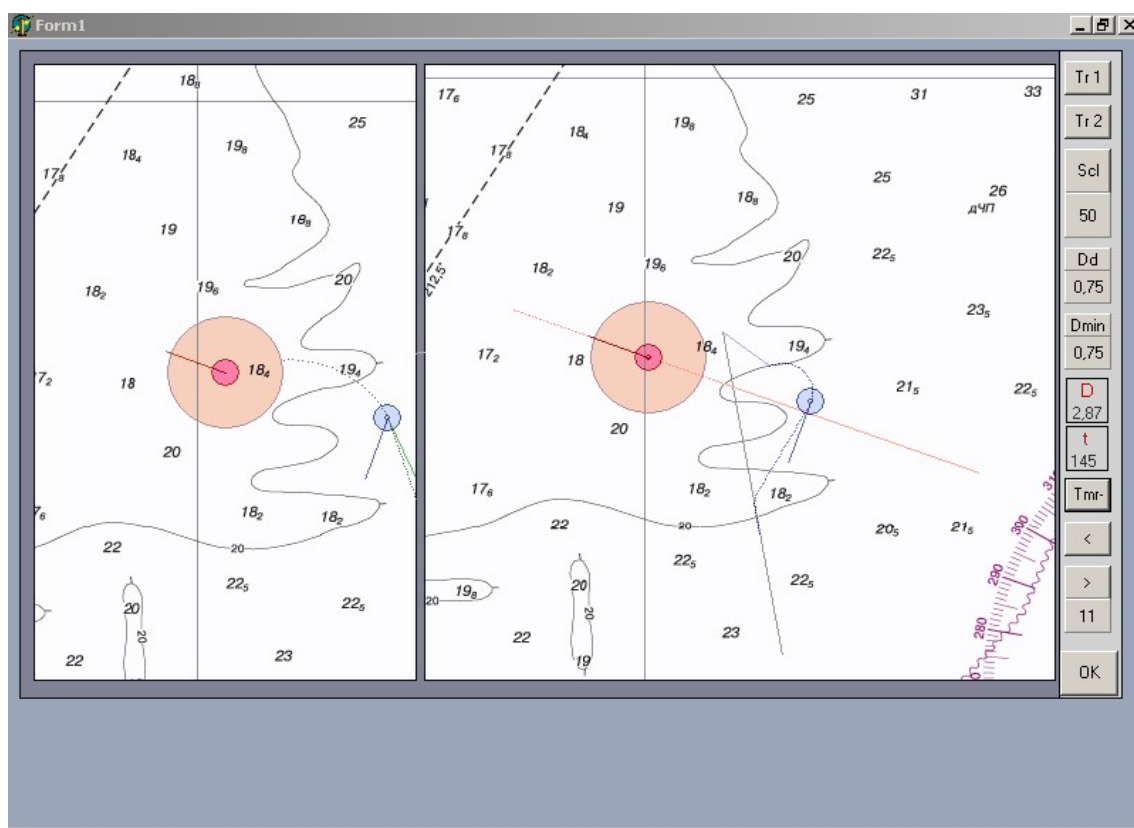
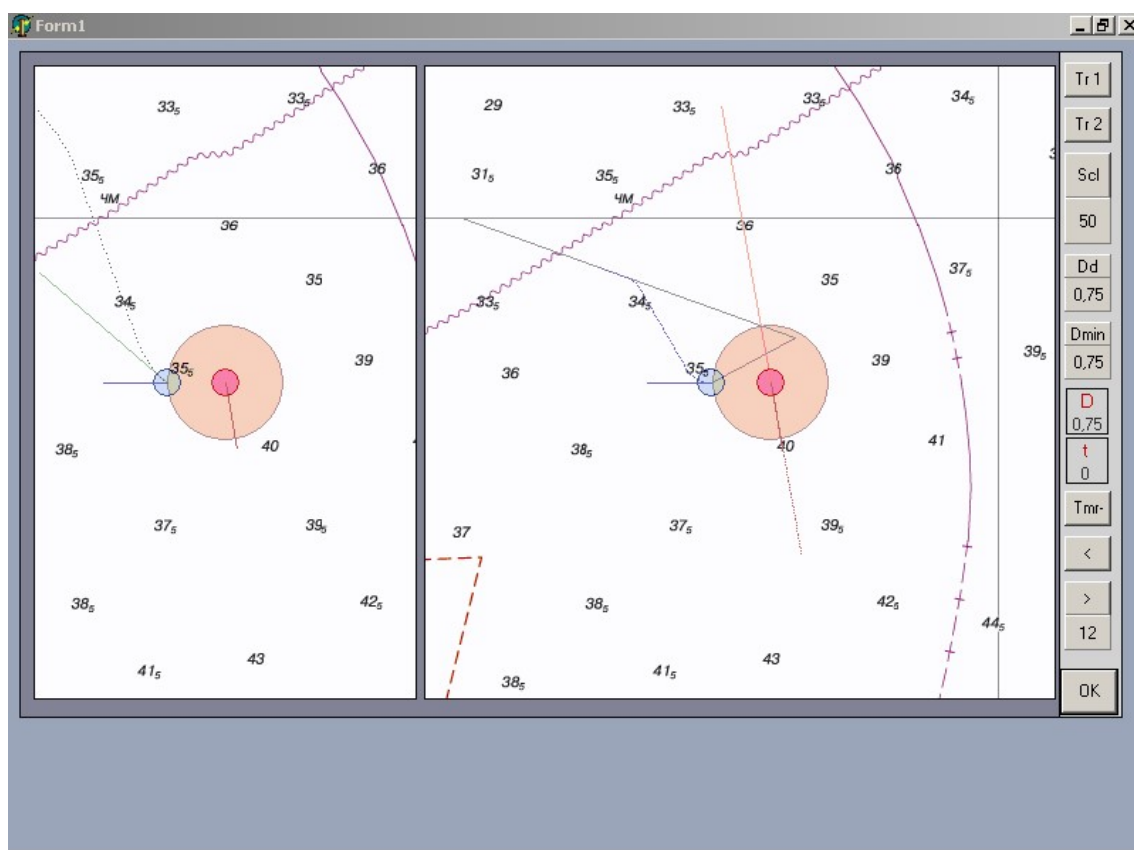
Рис. А22 – Ситуація 11 за  $t = 145$  с

Рис. А23 – Початкова ситуація 12 та рекомендований перший тип траєкторії

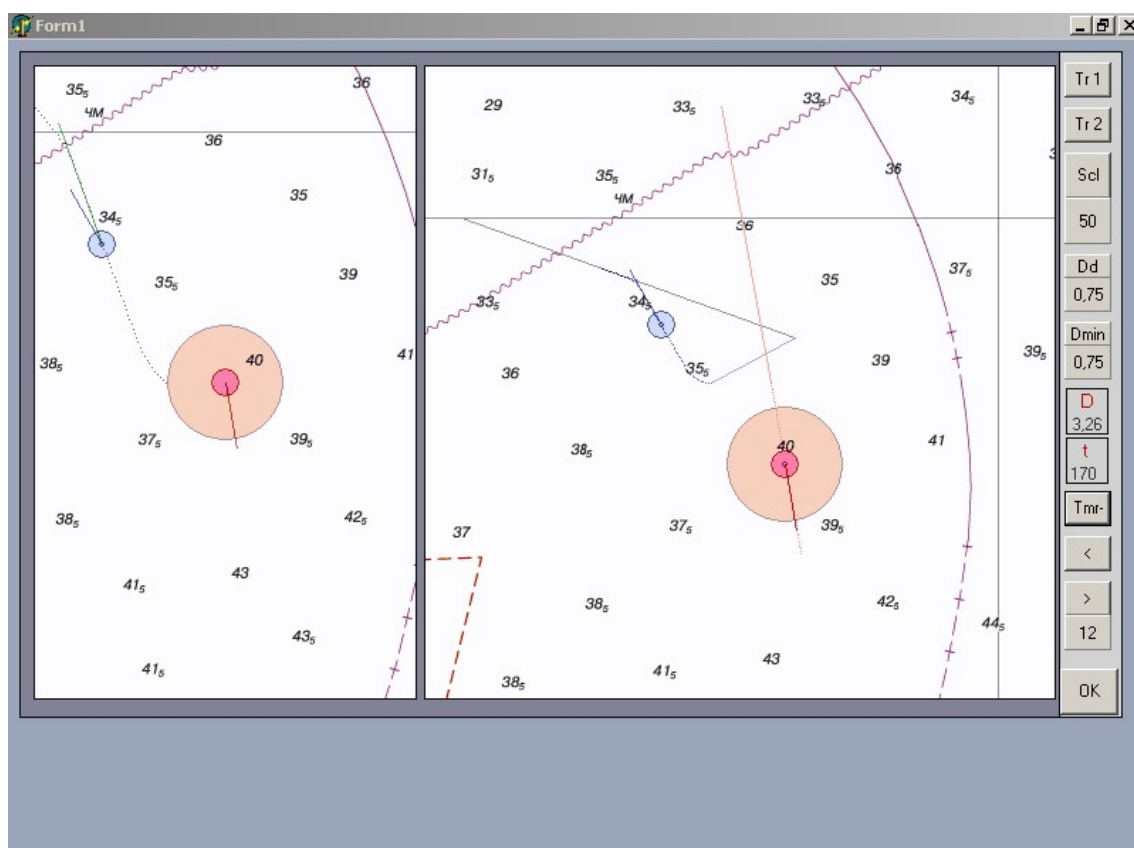
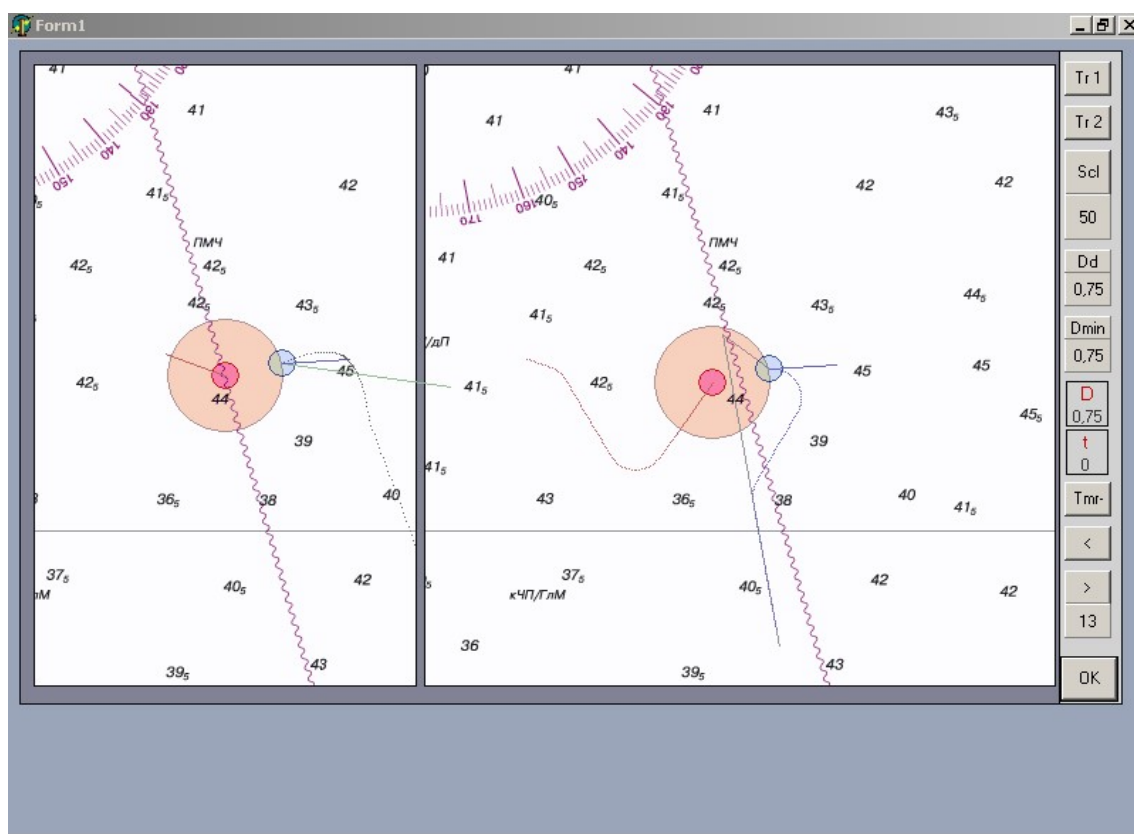
Рис. А24 – Ситуація 12 за  $t = 170$  с

Рис. А25 – Початкова ситуація 13 та рекомендований перший тип траєкторії

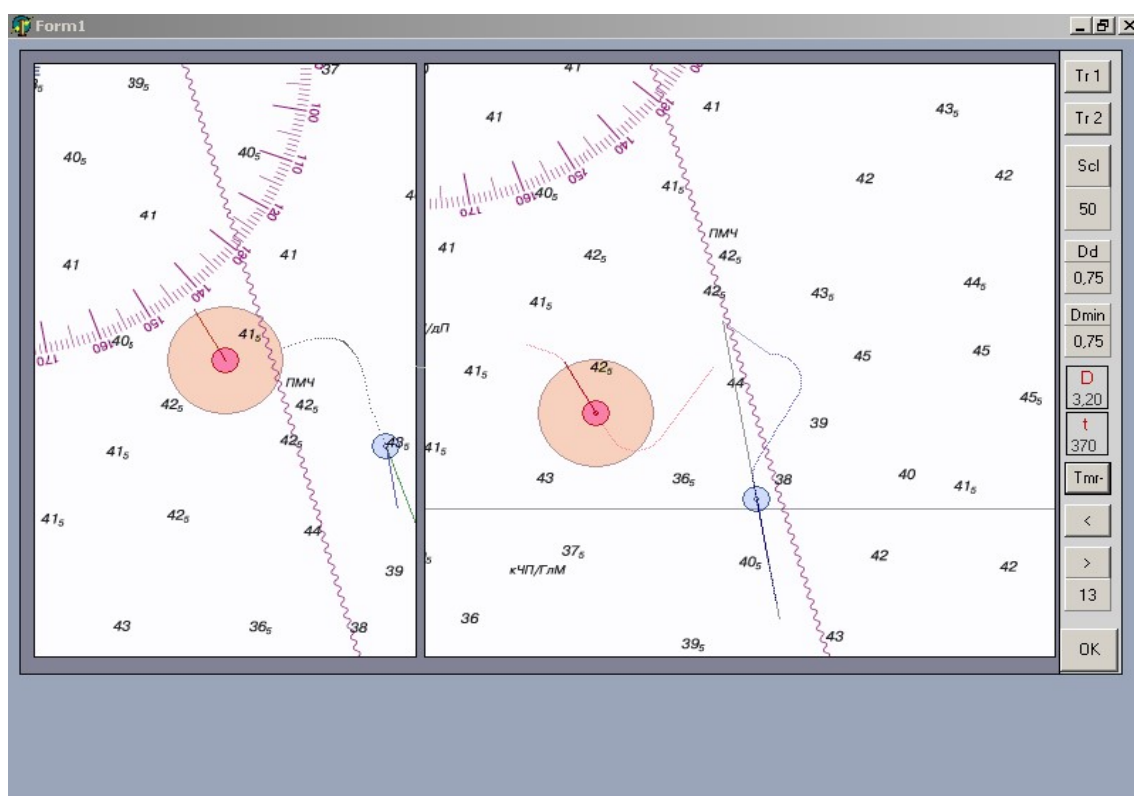
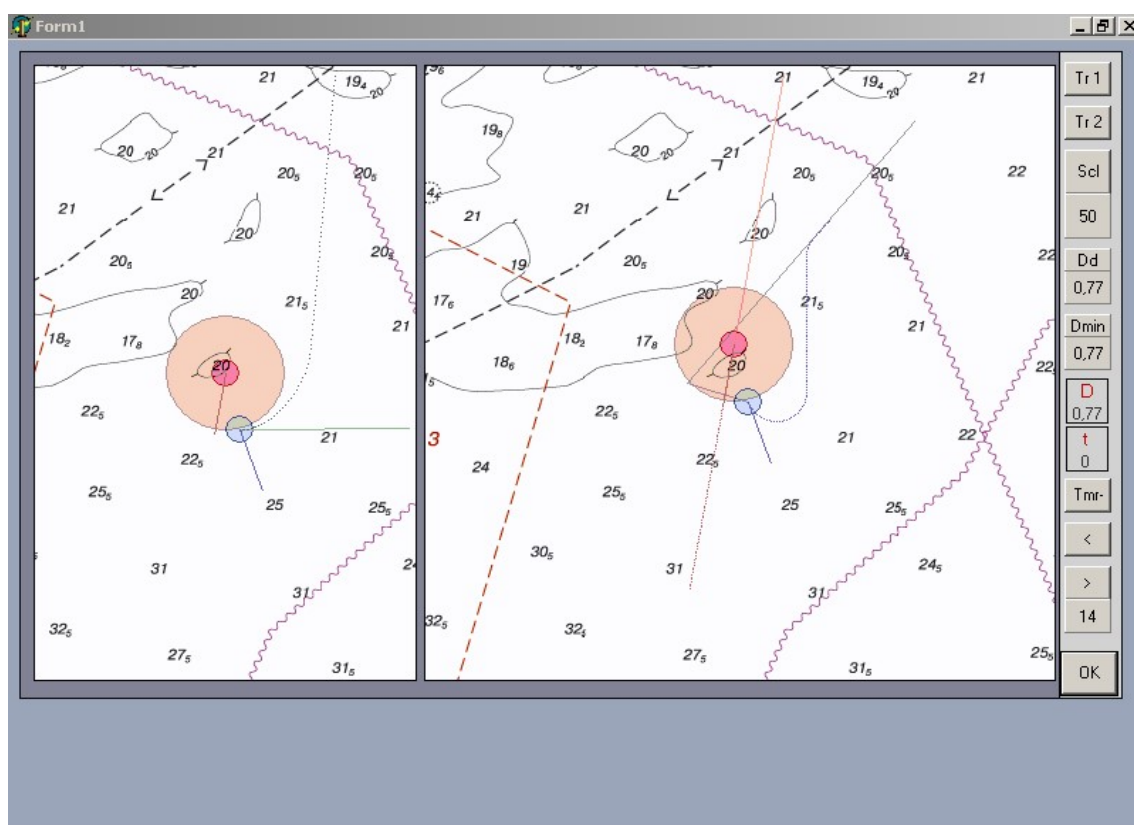
Рис. А26 – Ситуація 13 за  $t = 370$  с

Рис. А27 – Початкова ситуація 14 та рекомендований перший тип траєкторії

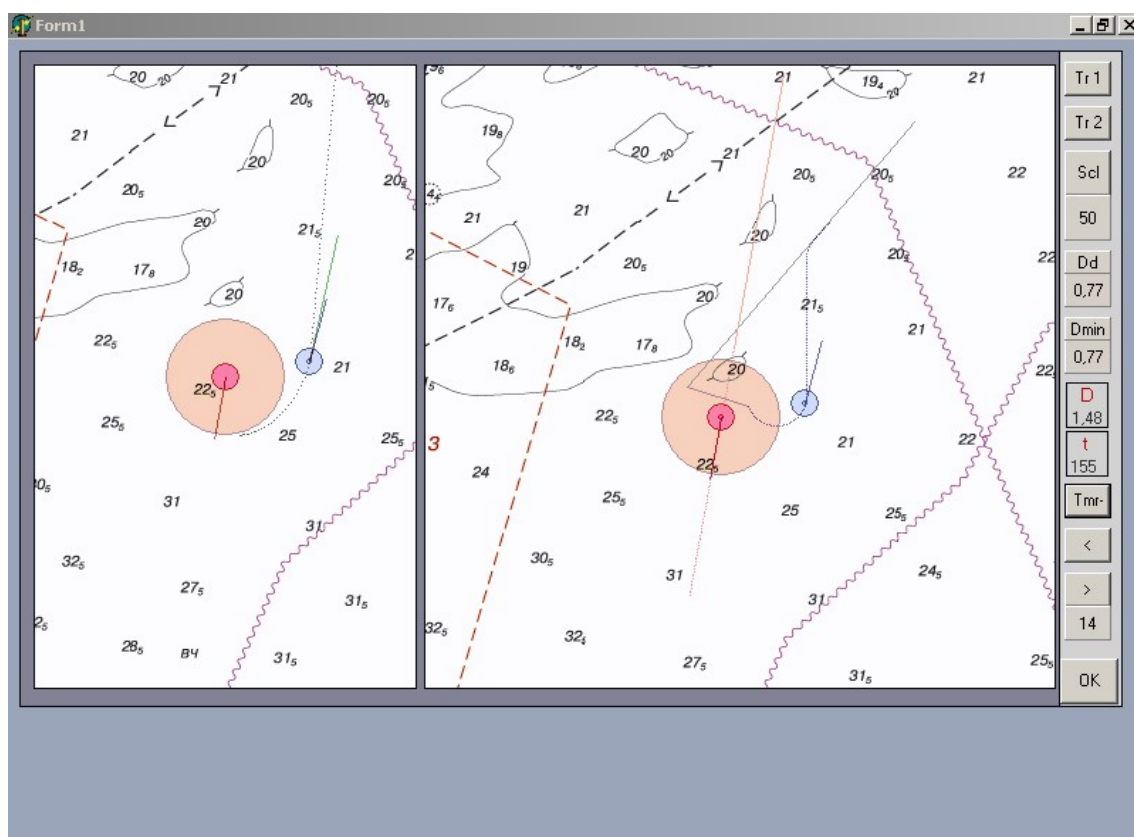
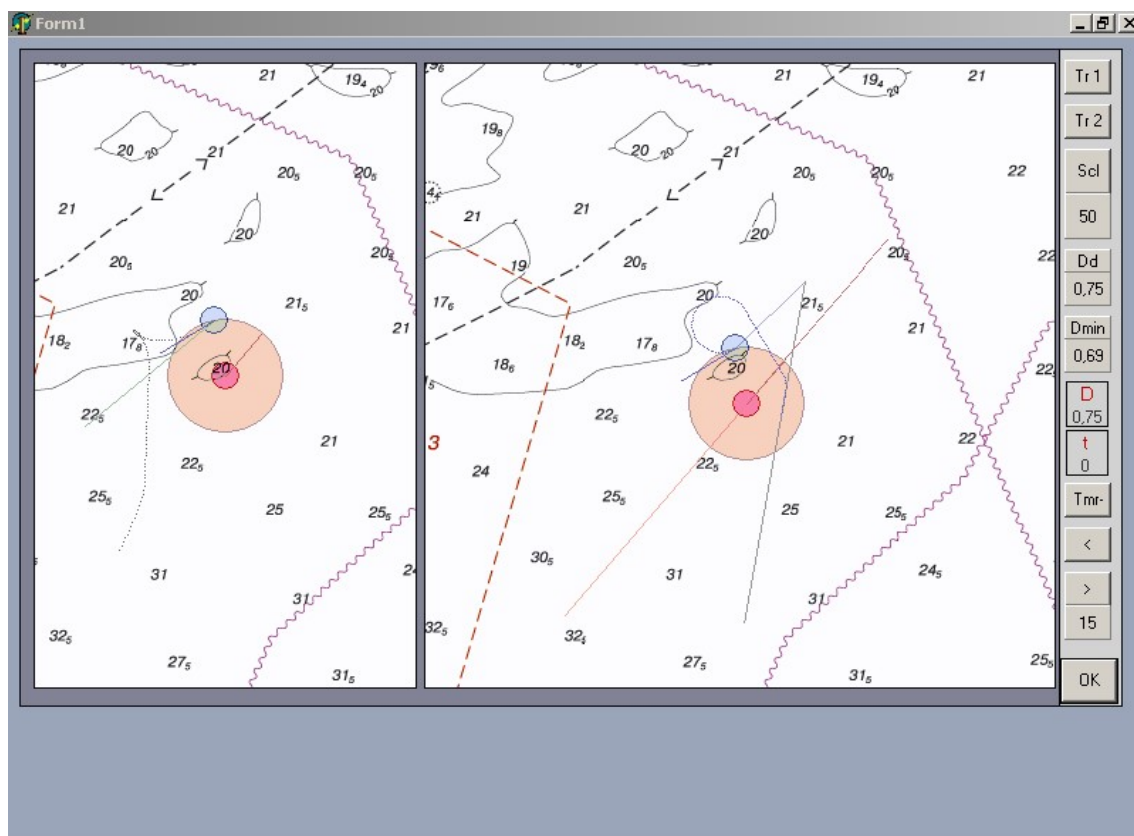
Рис. А28 – Ситуація 14 за  $t = 155$  с

Рис. А29 – Початкова ситуація 15 та рекомендований другий тип траєкторії

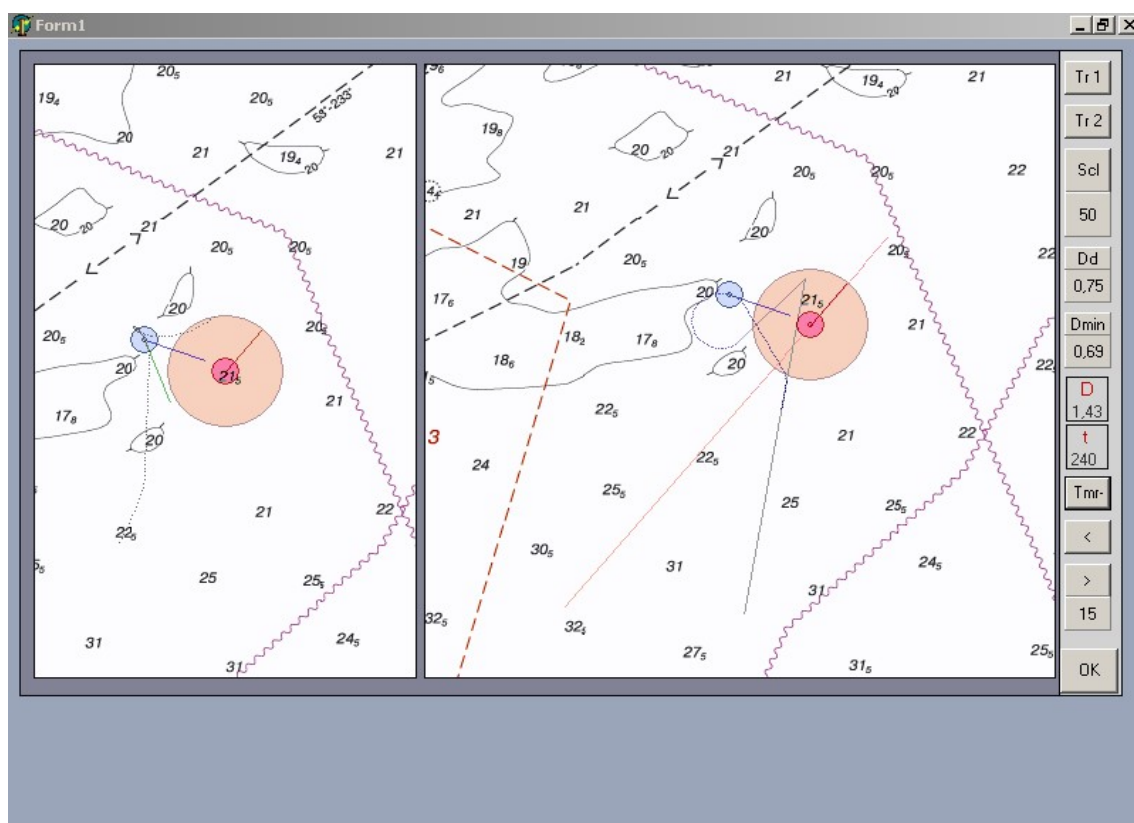
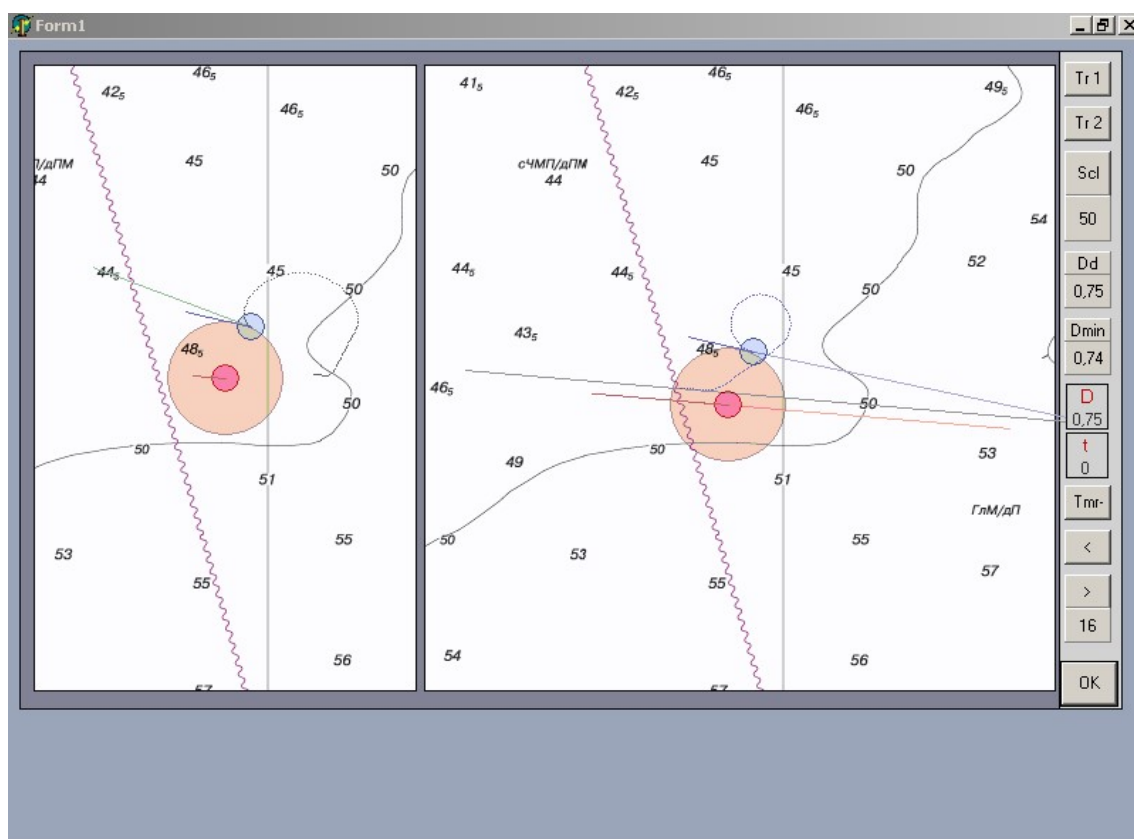
Рис. А30 – Ситуація 15 за  $t = 240$  с

Рис. А31 – Початкова ситуація 16 та рекомендований другий тип траєкторії

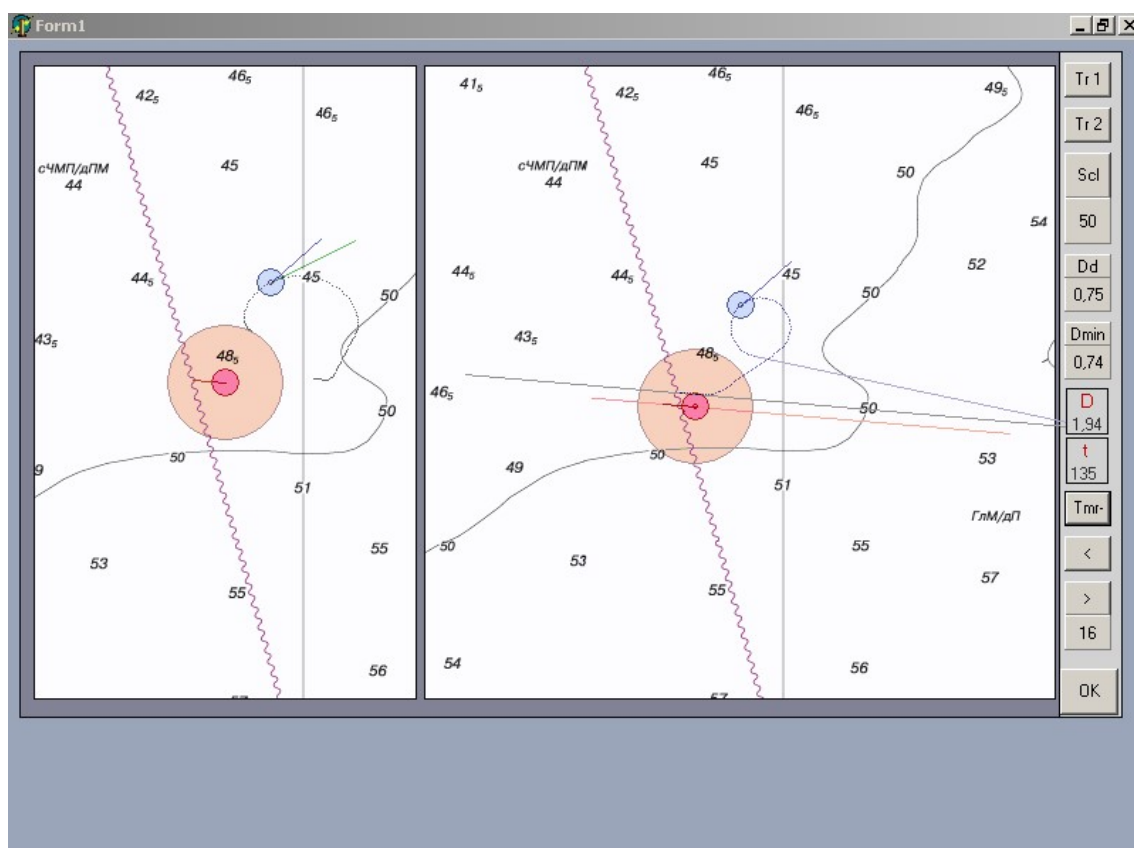
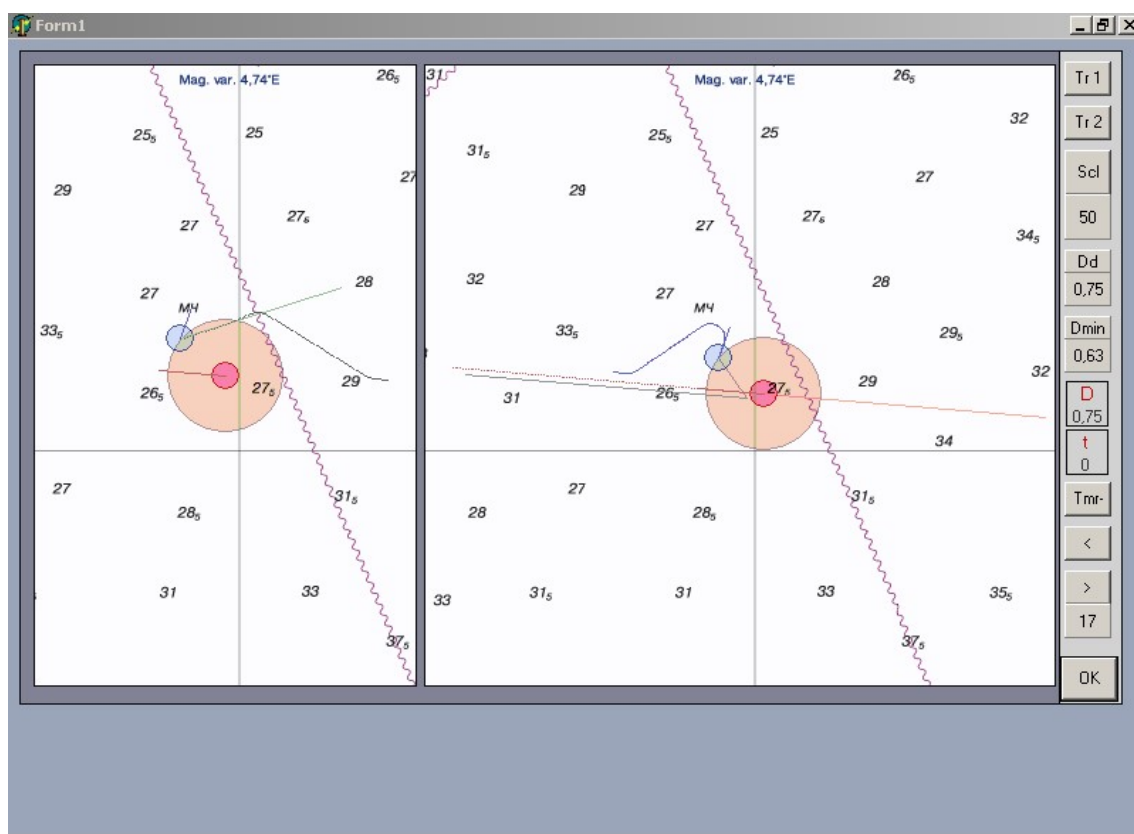
Рис. А32 – Ситуація 16 за  $t = 135$  с

Рис. А33 – Початкова ситуація 17 та рекомендований третій тип траскторії

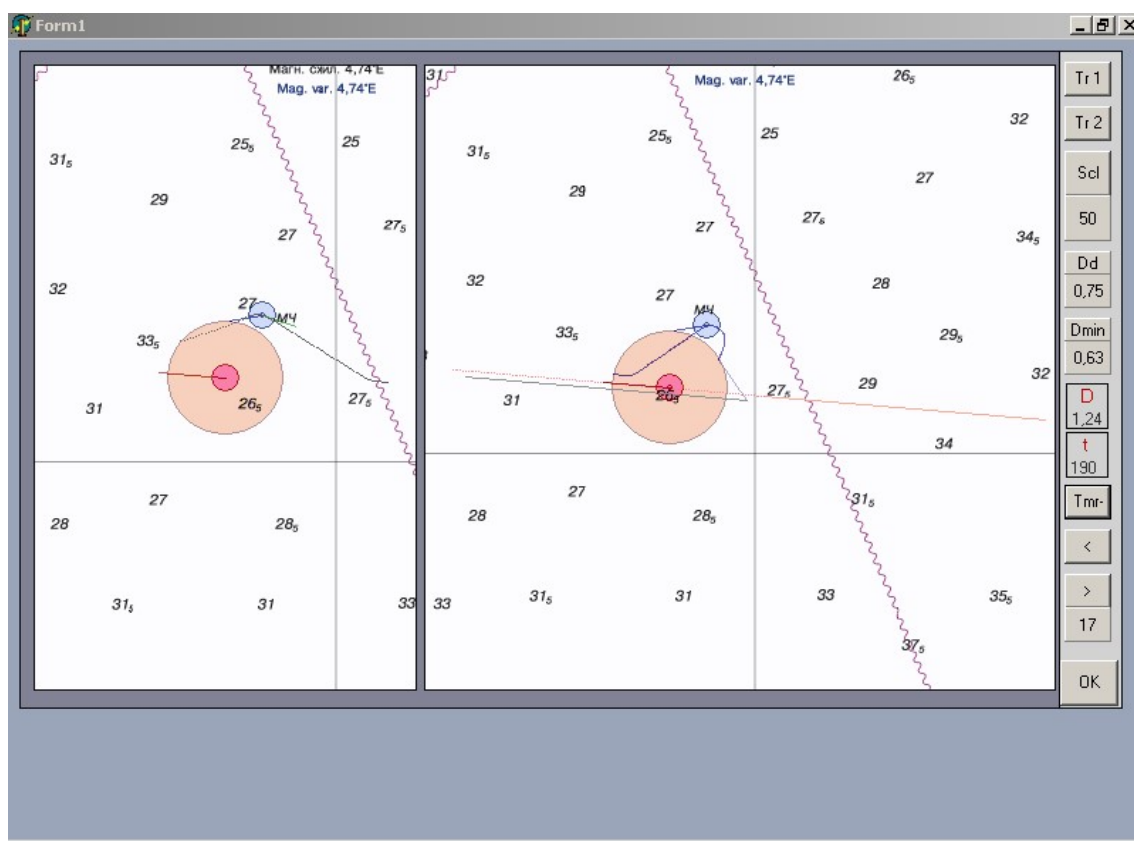
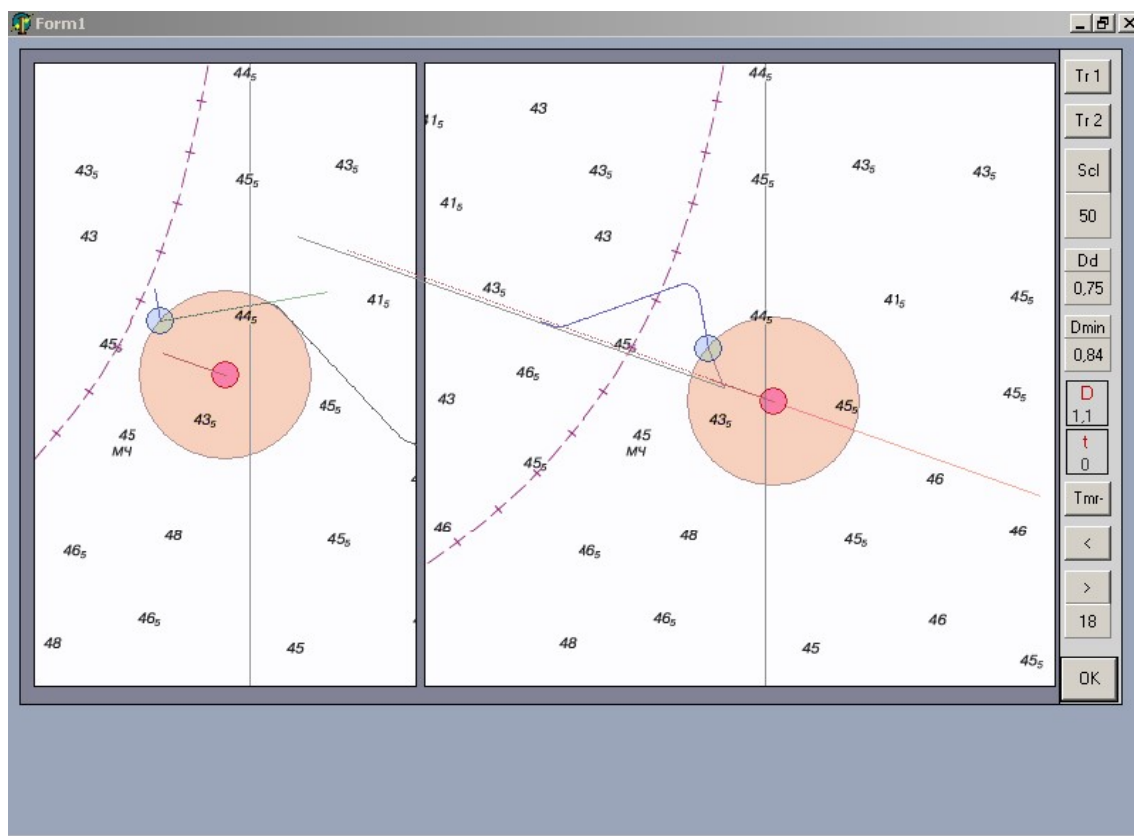
Рис. А34 – Ситуація 17 за  $t = 190$  с

Рис. А35 – Початкова ситуація 18 та рекомендований третій тип траєкторії

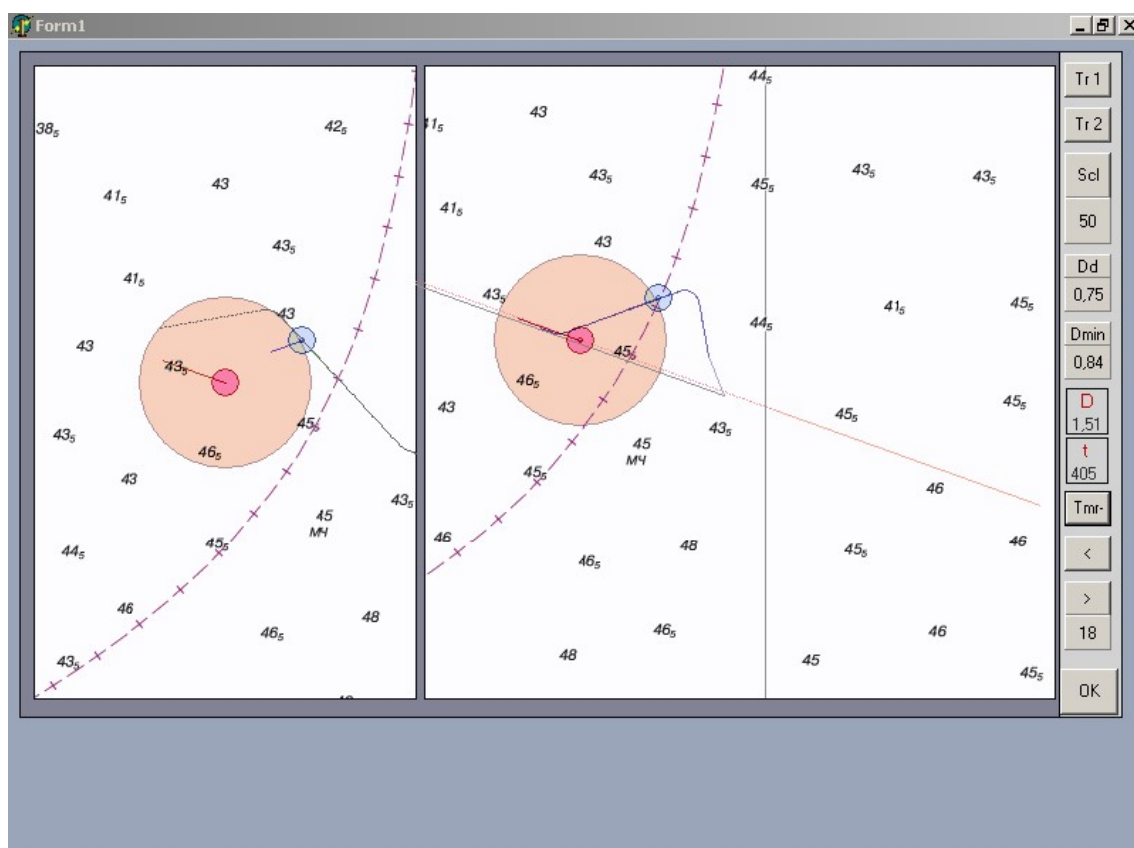
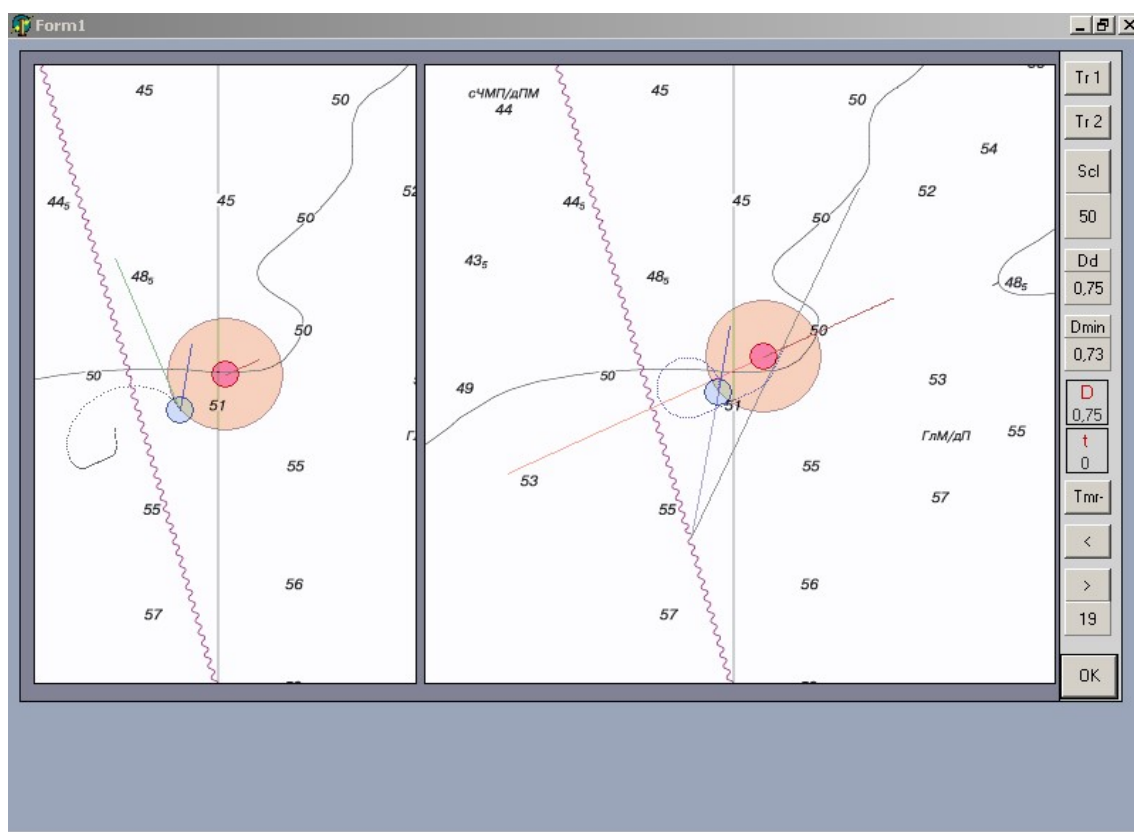
Рис. А36 – Ситуація 18 за  $t = 405$  с

Рис. А37 – Початкова ситуація 19 та рекомендований другий тип траєкторії

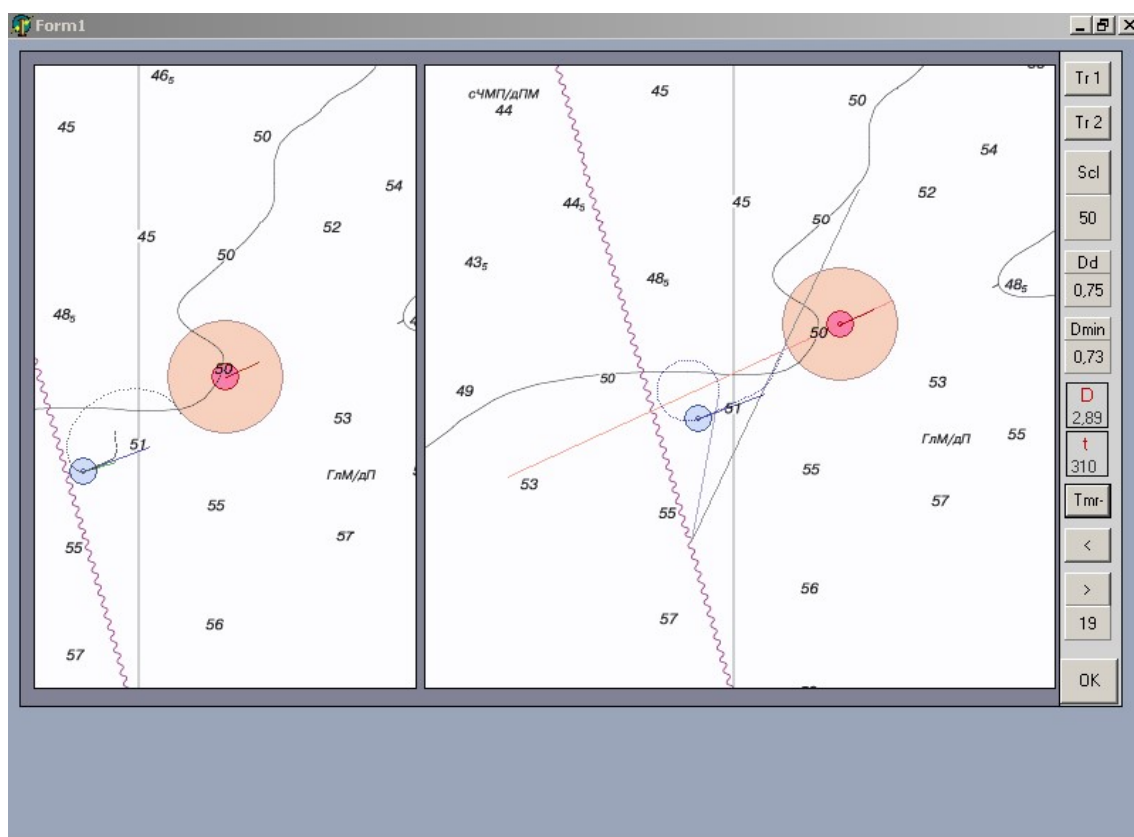
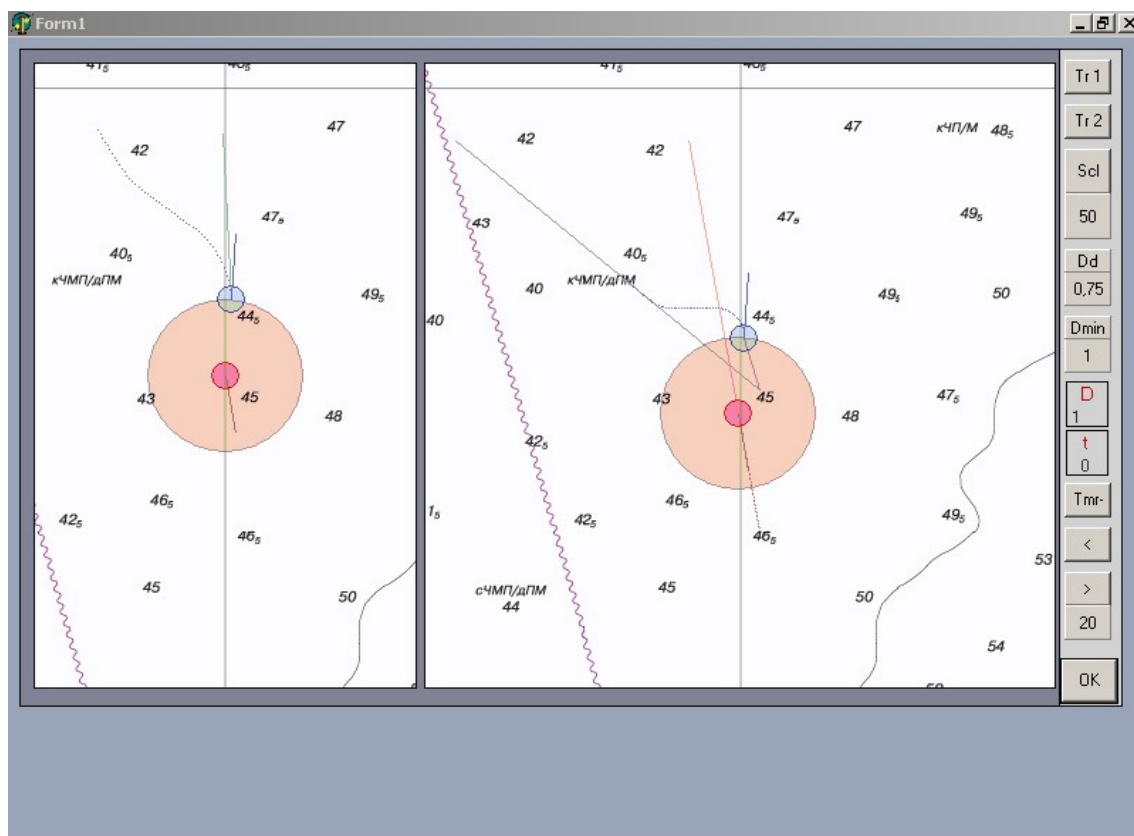
Рис. А38 – Ситуація 19 за  $t = 310$  с

Рис. А39 – Початкова ситуація 20 та рекомендований перший тип траєкторії

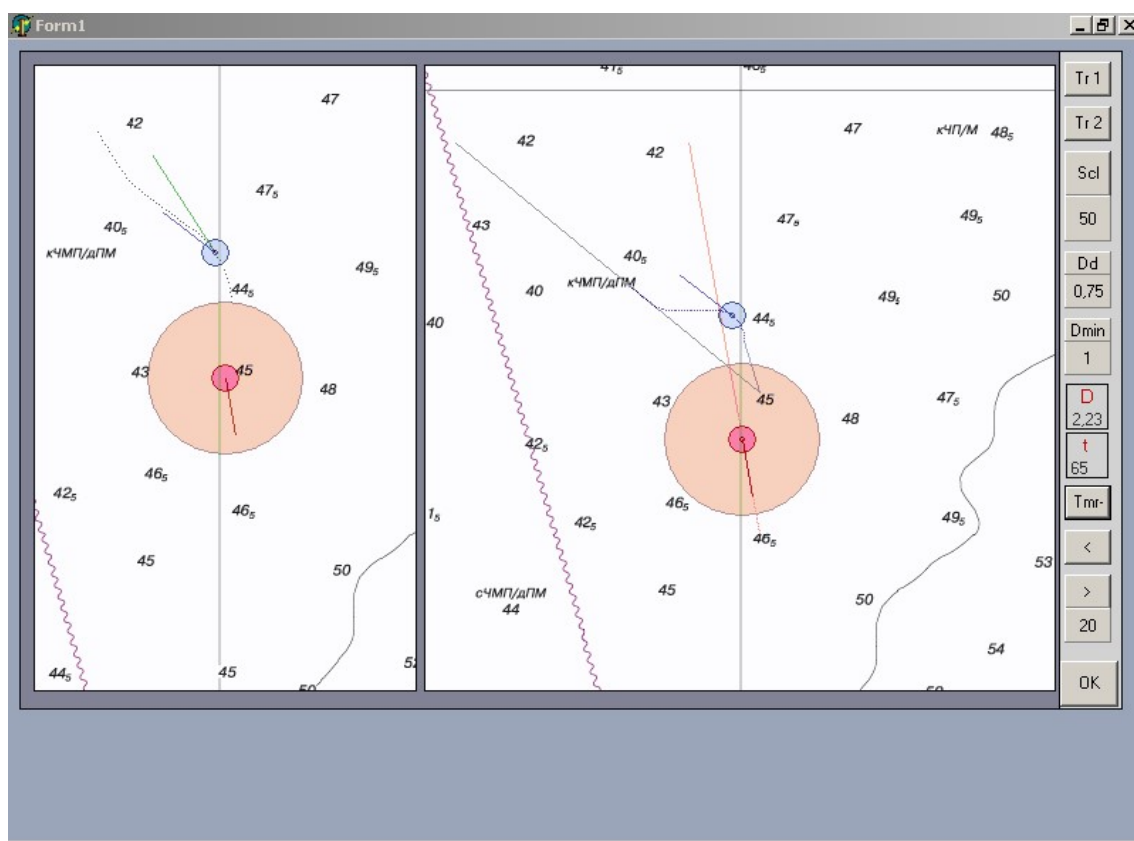
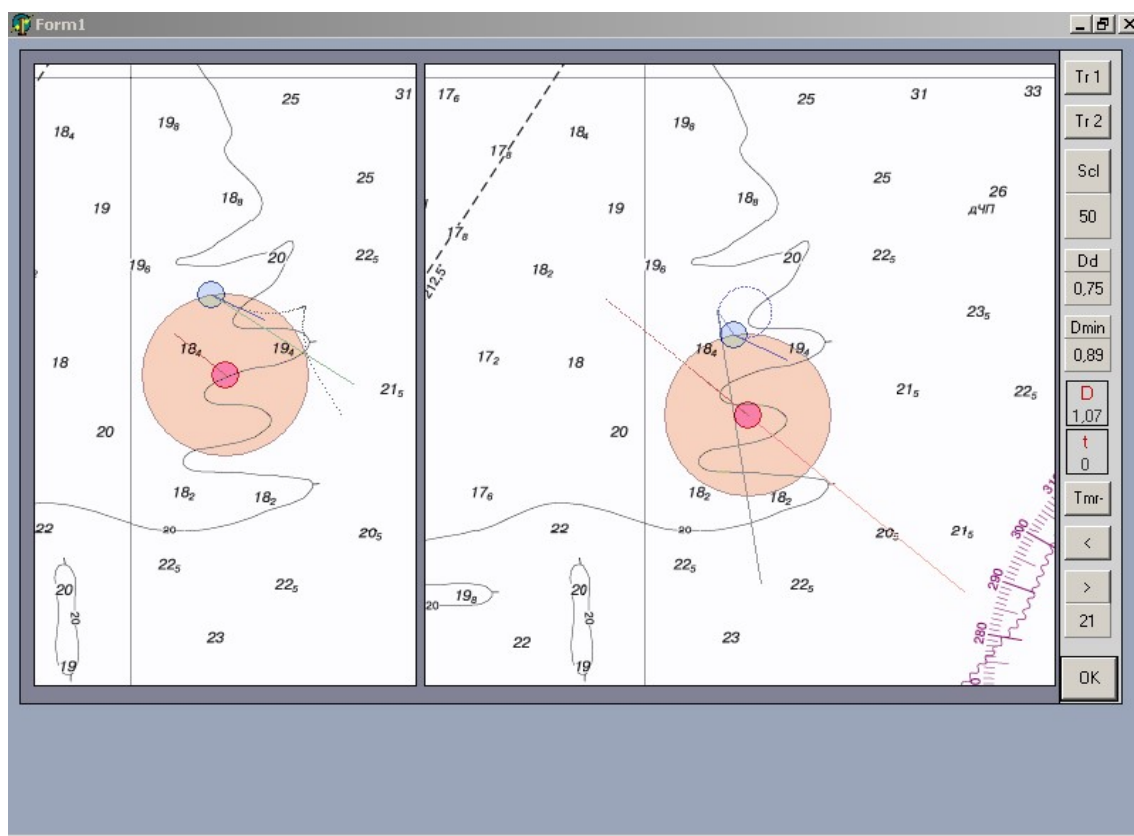
Рис. А40 – Ситуація 20 за  $t = 65$  с

Рис. А41 – Початкова ситуація 21 та рекомендований другий тип траєкторії

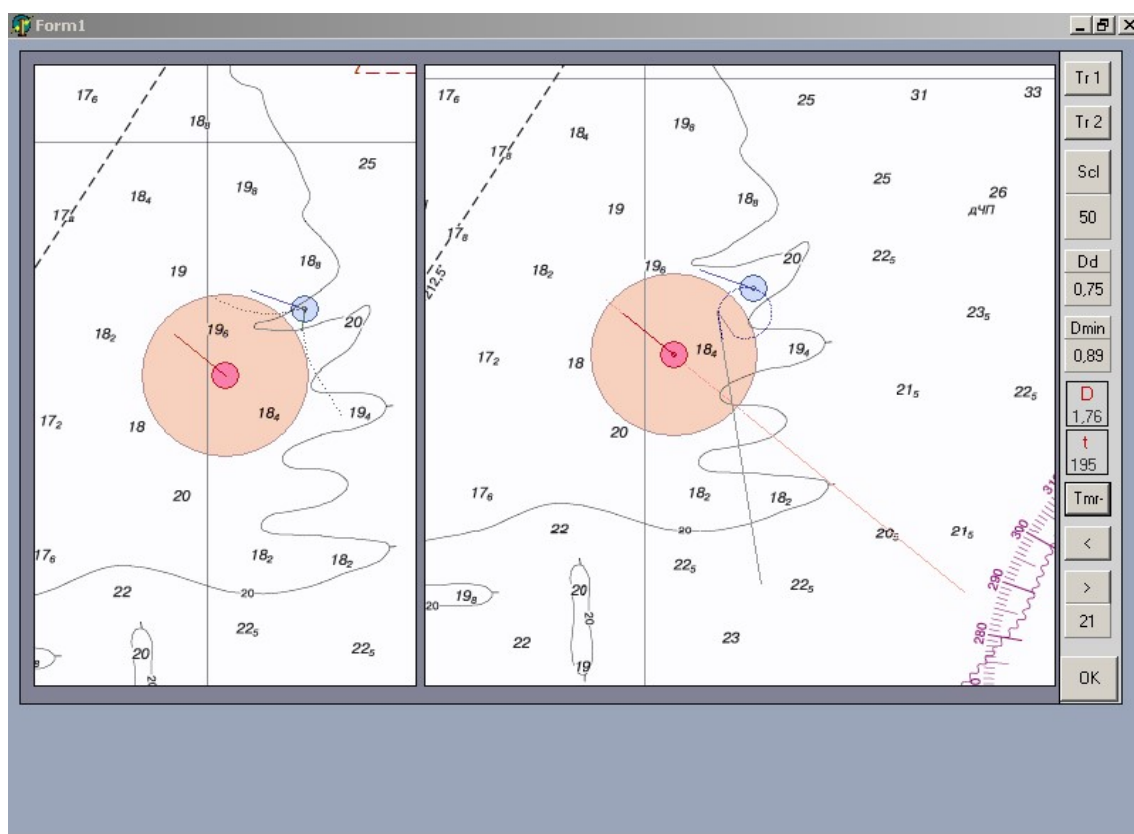
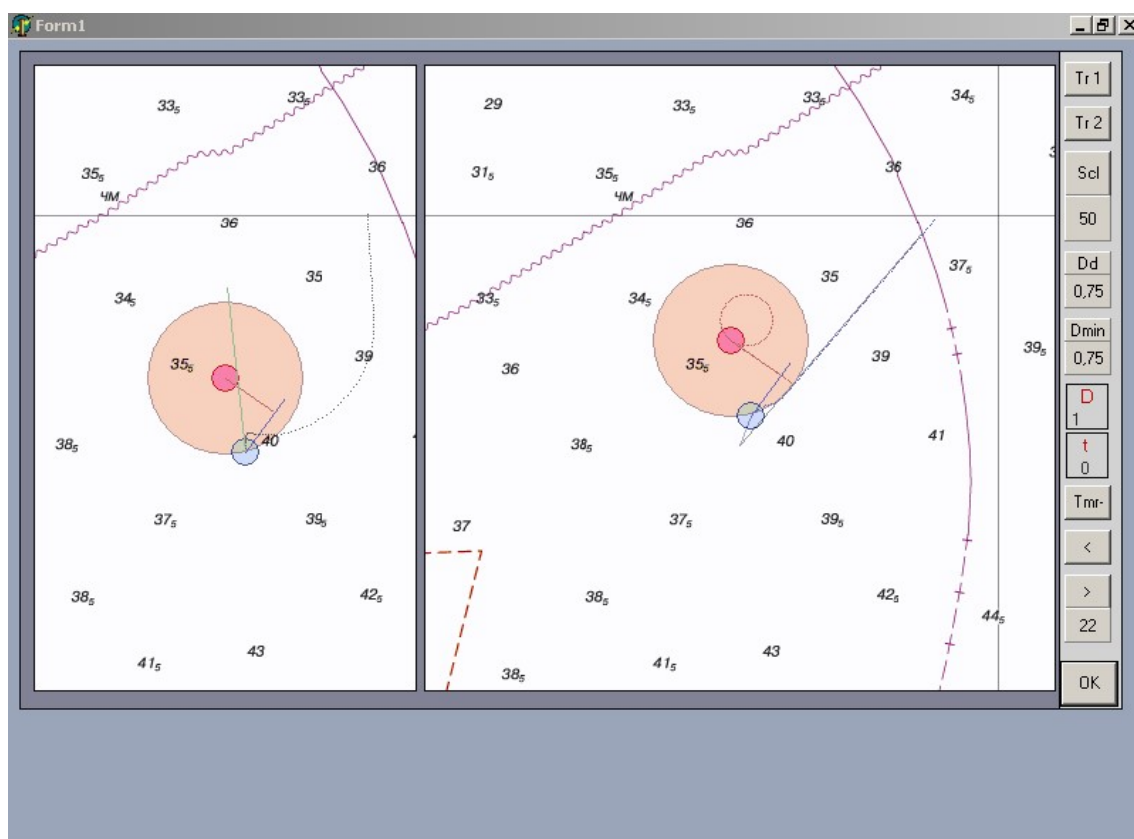
Рис. А42 – Ситуація 21 за  $t = 195$  с

Рис. А43 – Початкова ситуація 22 та рекомендований перший тип траєкторії

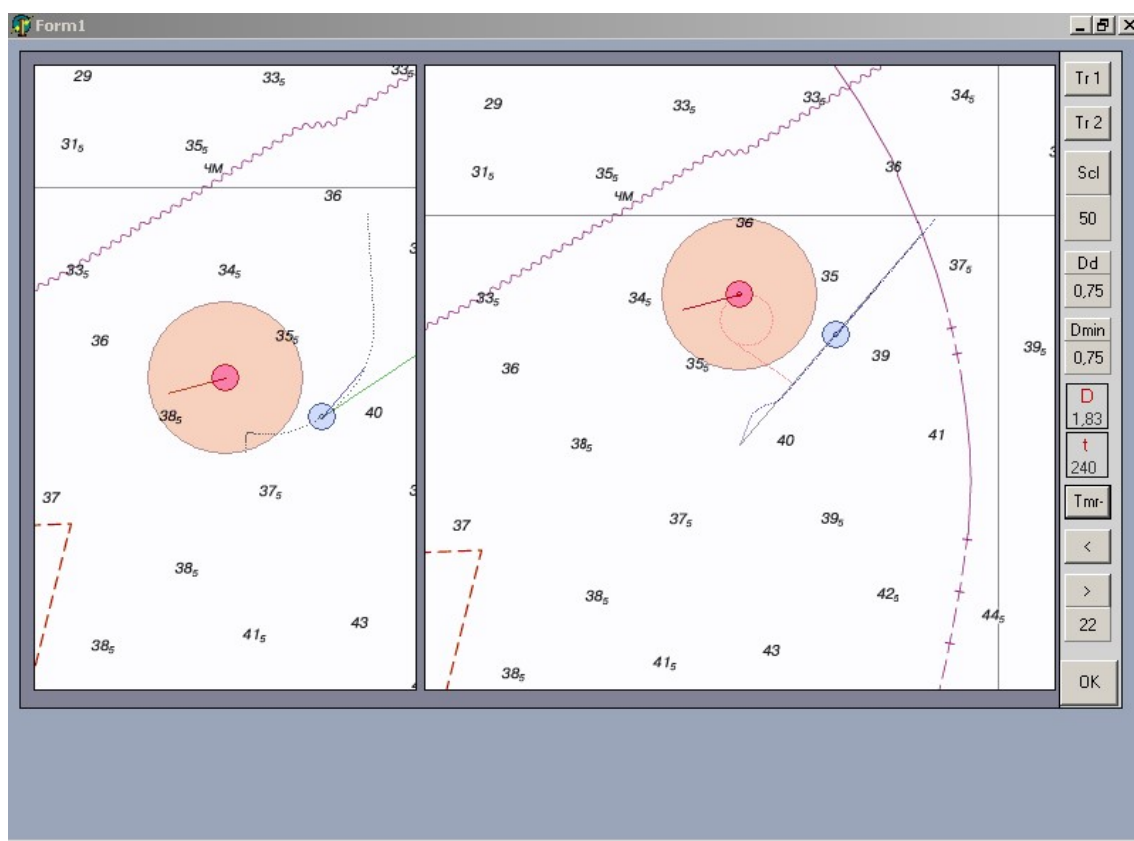
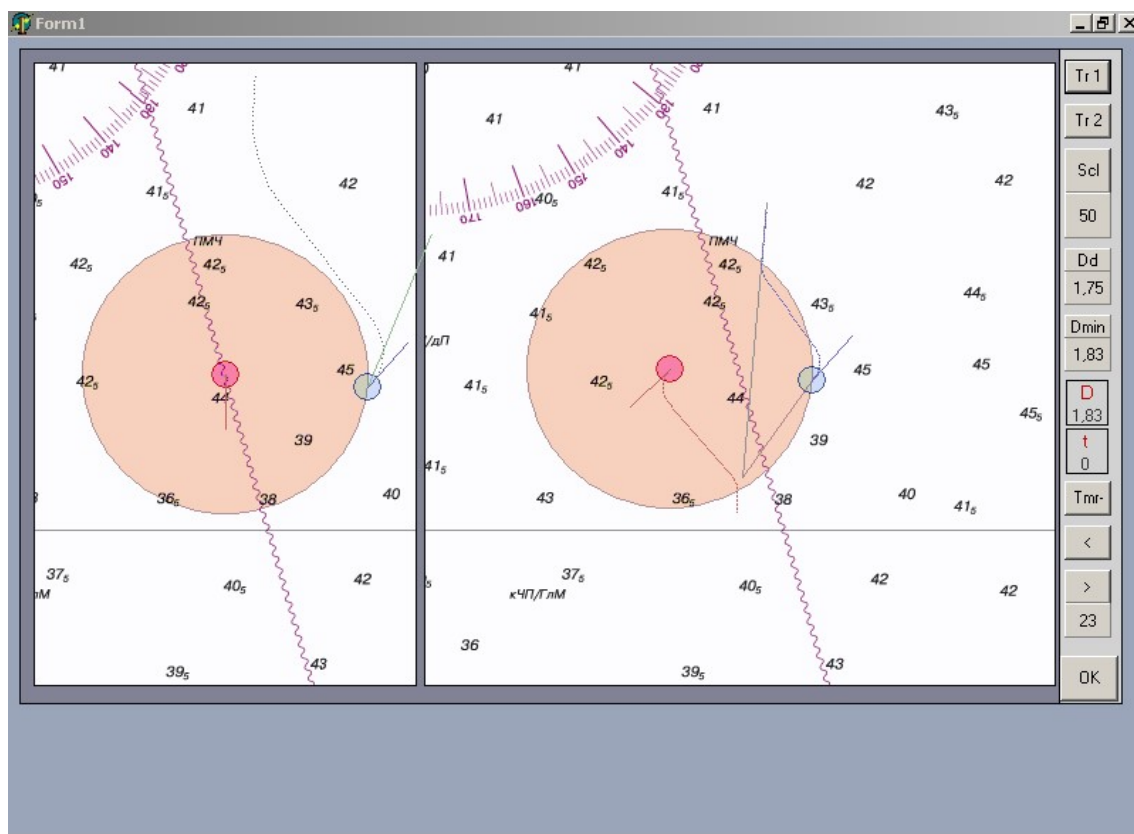
Рис. А44 – Ситуація 22 за  $t = 240$  с

Рис. А45 – Початкова ситуація 23 та рекомендований перший тип траєкторії

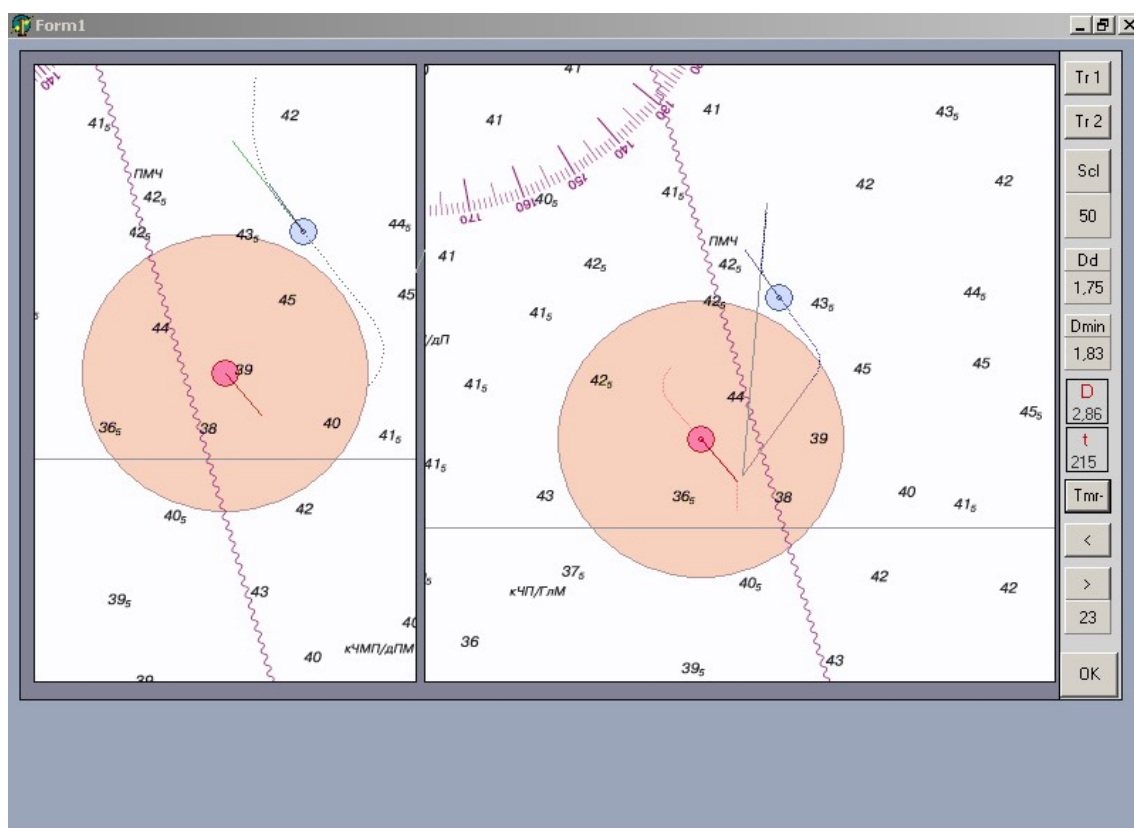
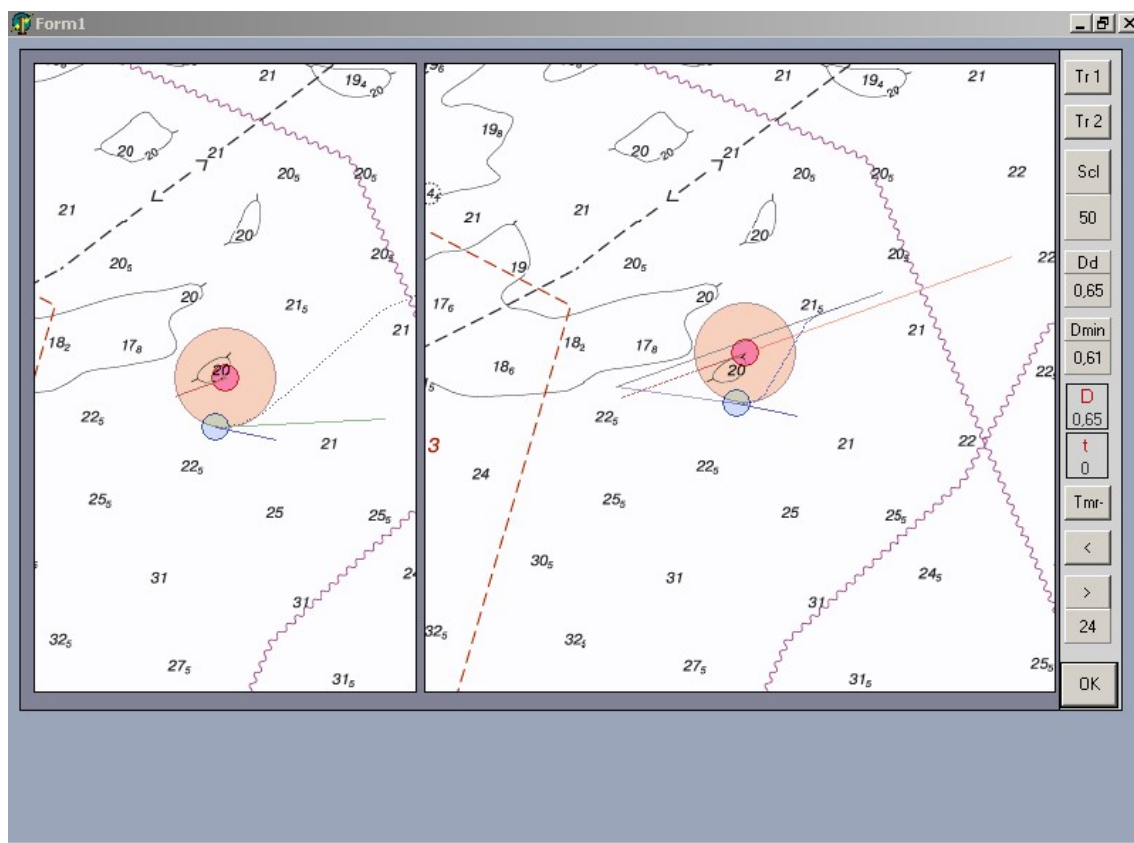
Рис. А46 – Ситуація 23 за  $t = 215$  с

Рис. А47 – Початкова ситуація 24 та рекомендований перший тип траєкторії

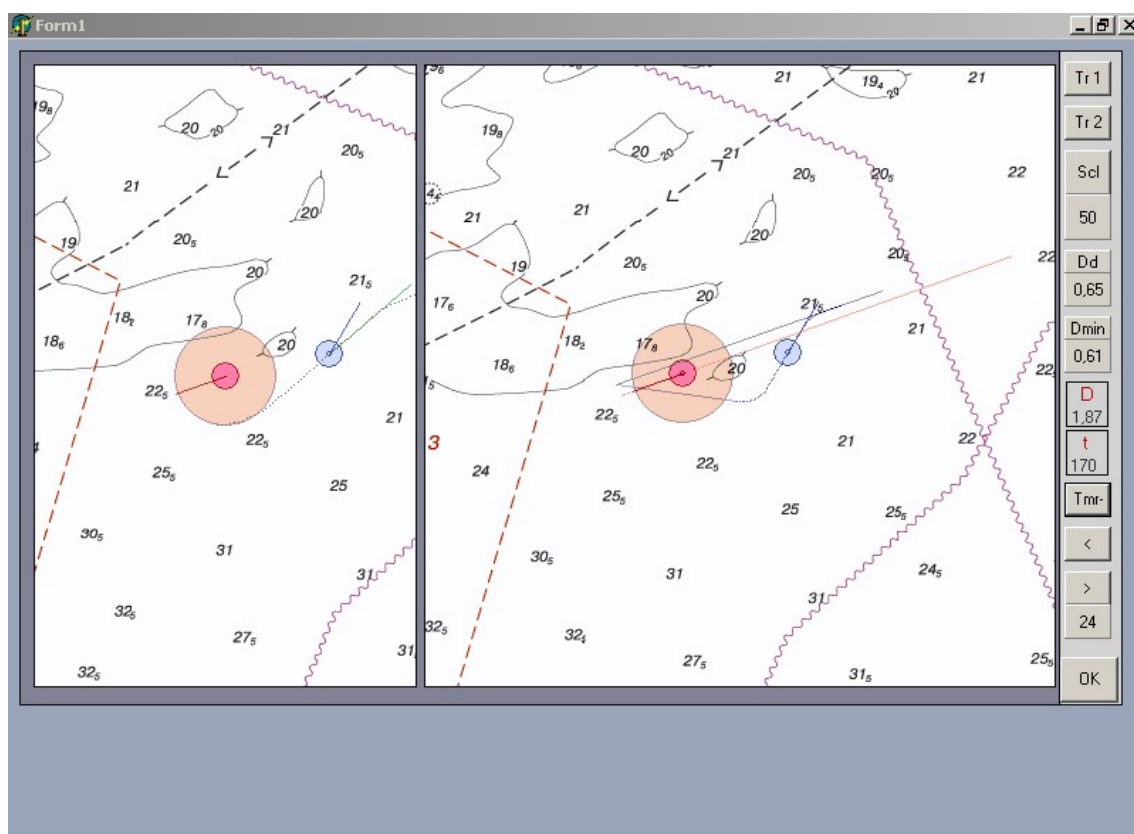


Рис. А48 – Ситуація 24 за  $t = 170$  с

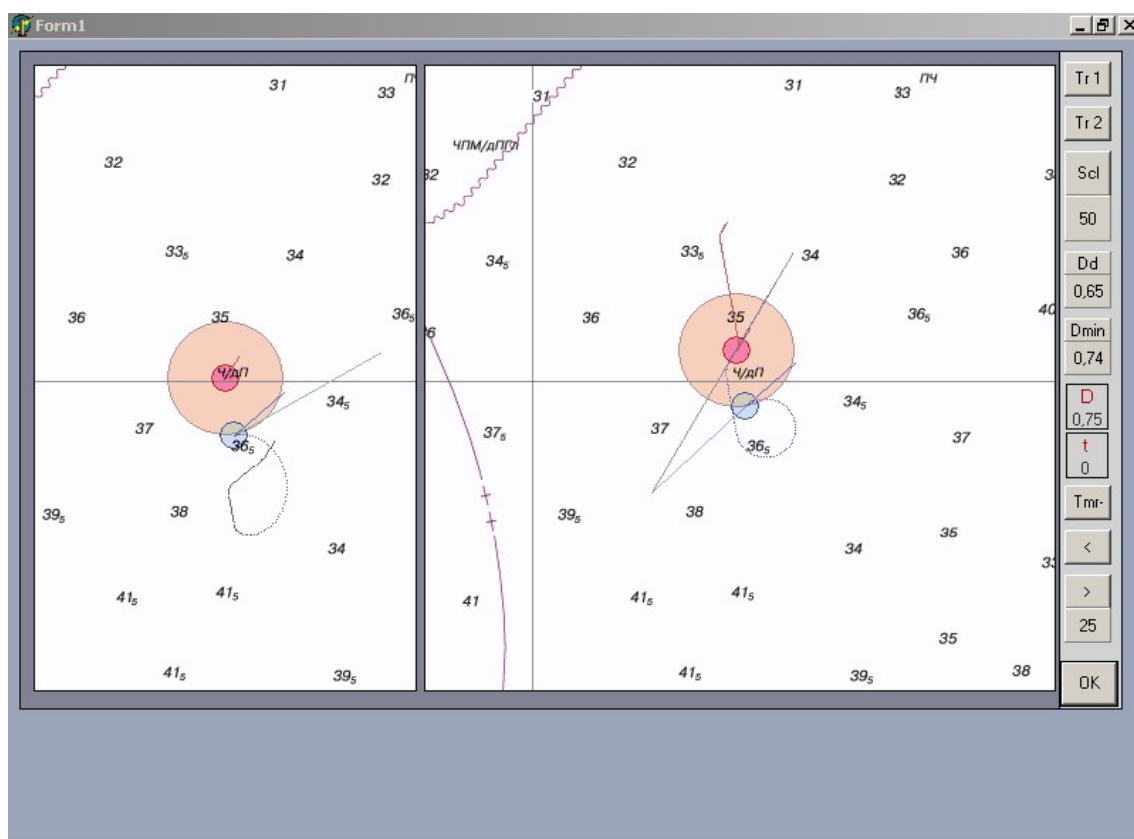


Рис. А49 – Початкова ситуація 25 та рекомендований другий тип траєкторії

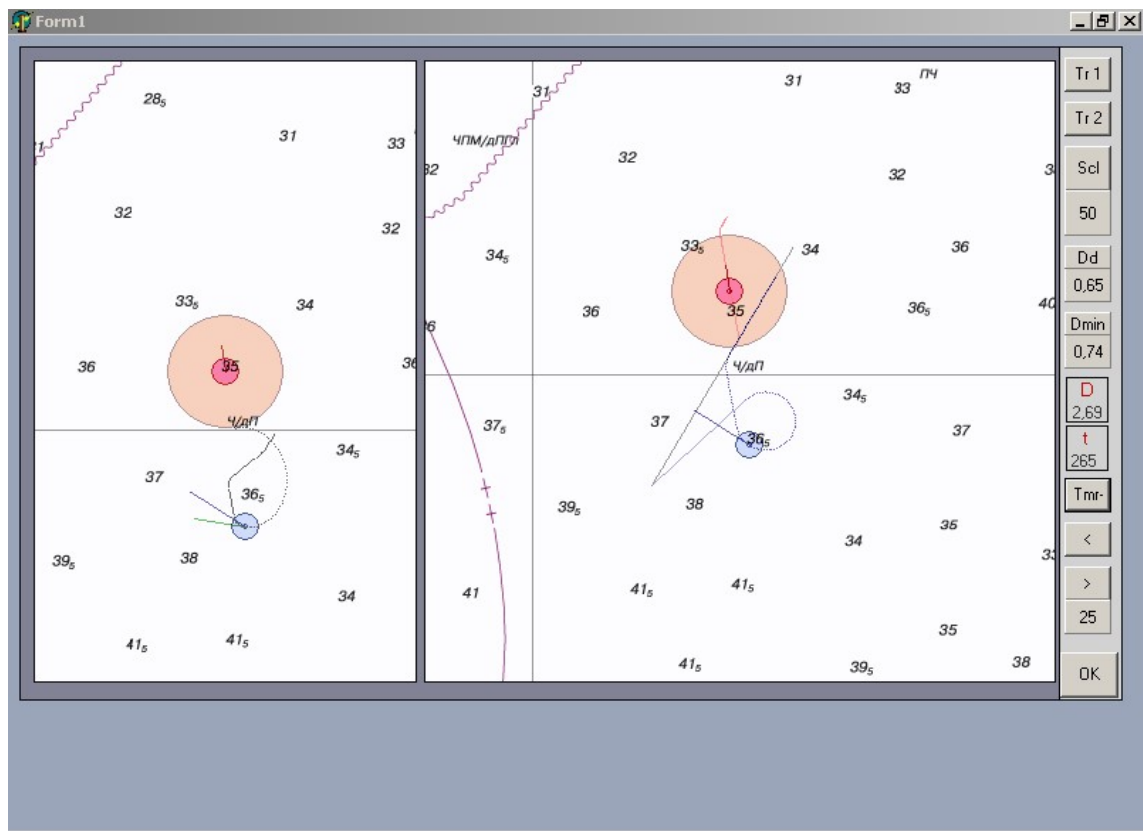


Рис. А50 – Ситуація 25 за  $t = 265$  с

## ДОДАТОК Б

## Список опублікованих праць за темою дисертації

*Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:*

1. Kalinichenko T., Tymoshchuk O., Tomchakovsky G. Maneuver of returning the vessel to the set track after passing the target. *Науково-технічний збірник «Судноводіння / Shipping & Navigation»*. –2022. – Вип. 34. – С. 59-65. doi: 10.31653/2306-5761.34.2023.59-65 [https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023\\_T.-Kalinichenko-O.-Tymoshchuk-G.-Tomchakovsky-Maneuver-of-returning-the-vessel-to-the-set-track-after-passing-the-target.pdf](https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023_T.-Kalinichenko-O.-Tymoshchuk-G.-Tomchakovsky-Maneuver-of-returning-the-vessel-to-the-set-track-after-passing-the-target.pdf).
2. Ганношина І.М., Калініченко Т.В., Нікітін П.В. Дослідження методів прогнозування руху, пошуку та супроводження морських об'єктів. *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – № 2(36). – 2022. – С. 135-149. doi: doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.11 <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/237>
3. Калініченко Т.В. Комп'ютерне моделювання безпечного повернення суден на програмні траєкторії руху. *Наука і техніка сьогодні*. – №11 (25). – 2023. С. 670-677 [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-11\(25\)-670-677](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-11(25)-670-677) <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/6605>
4. Калініченко Т.В. Вибір маневра повернення судна на програмну траєкторію руху без координації з ціллю. *Вісник Одеського національного морського університету*. – Вип. 70. – 2023. – С. 47-57. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-47-57> <http://visnyk.onmu.org.ua/index.php/1/article/view/164>.
5. Калініченко Т.В. Урахування судна, що заважає, під час розходження судна з судном-ціллю на малих відстанях. *Водний транспорт: Збірник наукових*

праць. – № 1(37). – 2023. – С. 79-85. doi: doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.08  
<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/255>

6. Калініченко Т.В. Розробка методу оперативного управління судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації. *Вісник Одеського національного морського університету*. – Вип. 73. – 2024. – С. 155-169.  
<https://doi.org/10.47049/2226-1893-2024-2-155-169>.  
<http://visnyk.onmu.org.ua/index.php/1/article/view/216>

7. Калініченко Т.В. Основні напрямки підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнення суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. – Вип. 48. – 2024. – С. 178-183.  
<https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310709>  
[https://journals.uran.ua/vestnikpgtu\\_tech/article/view/310709](https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/310709)

*Публікація в виданнях, що входять до провідних міжнародних наукометричних баз*

8. Kalinichenko T. Characteristics of the divergence of vessels at small initial distances. *European Science, Scientific research in modern conditions of instability*. –1 (sge24-01). – 2023. – С. 92–135. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-24-01-015>  
<https://desymp.promonograph.org/index.php/sge/article/view/sge24-01-015>  
*(IndexCopernicus)*.

9. Kalinichenko T., Kalinichenko Y., Tymoshchuk O. Account of navigational hazards when the ship and the target are avoiding collision at small distances. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*. – 2022. – С. 35-37. <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2022.002665>  
<https://journal.eu-jr.eu/ttfpits/article/view/2665> *(IndexCopernicus)*.

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

10. Тимошук О.М., Калініченко Т.В., Вінідчук С.О. Формалізація процесу побудови моделі розподіленого об'єкта управління. *Дніпровські читання-2022: матеріали III Міжнародної наук.-практ. конф. 8 грудня 2022 р. м. Київ: вид-во*

Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій, 2022. 276 с.

11. Калініченко Т.В. Розходження суден на незначних дистанціях за наявності точкової навігаційної небезпеки. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2023)*: Збірка матеріалів XV Міжнародної наук.-практ. конф. 24-25 травня 2023 р.. м. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2023. 344 с.

12. Тимошук О.М., Калініченко Т.В. Вибір маневра повернення судна на програмну траєкторію руху без координації з ціллю. *Дніпровські читання-2023*: матеріали IV Міжнародної наук.-практ. конф. 7 грудня 2023 р. м. Київ: вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій, 2023. 322 с.

13. Калініченко Т.В. Вибір маневра повернення судна на програмну траєкторію руху без координації з ціллю. *Наукові підсумки 2023 року*: збірка XII наук. конф. 20 грудня 2023 р. м Харків: вид-во Технологічний центр, 2023. 98 С.

14. Тимошук О.М., Калініченко Т.В. Аналіз потенціалу підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнення суден. *Навігація та керування судном: нові підходи, навчання та моделювання*: матеріали I Міжнародної наук.-практ. конф. 23-24 вересня 2024 р. м. Одеса: ОНМУ, 2024. 109 с.

## ДОДАТОК В



**"GLOBAL MARINE SERVICE"**  
 DE of company "GMS Marine Services Ltd"  
 Дочірнє підприємство "Глобал Марін Сервіс"  
 компанії "Джі-Ем-Ес Марін Сервіс Лімітед"  
 Україна, 65045, м. Одеса, вул., Ковальська, буд. 59, кв. 15

Вих.: 279-30/09  
 Дата: 30.09.2024

**А К Т**

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
**КАЛІНІЧЕНКО Тетяни Валентинівни** на тему «Розробка методу  
 розходження суден з урахуванням повернення на програмні траєкторії руху» у  
 процес підготовки офіцерів-судноводіїв ДП «Глобал Марін Сервіс»

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи на  
 здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 271-Морський та  
 внутрішній водний транспорт, здобувачки Калініченко Т.В. на тему «Розробка  
 методу розходження суден з урахуванням повернення на програмні траєкторії  
 руху», а саме: метод оперативного управління судном та метод розходження  
 суден з урахуванням на програмні траєкторії руху, впроваджені і успішно  
 використовуються у процес перепідготовки офіцерів-судноводіїв, працюючих  
 на судах ДП «Глобал Марін Сервіс» Компанії «GMS Marine Services LTD».

Директор ДП «Глобал Марін Сервіс»



Юрій ПАНЬКОВ

tel. + 380-48-7155457, + 380-48-7384967;  
 fax: +380-48-7155458

e-mail: gms@gms.od.ua; info@gms.od.ua;  
 website: globalmarine.com.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор ХДМА з НІПР

к.т.н., професор

Бень А.П.

26.07.2024 р.



Акт

про використання результатів дисертаційної роботи  
**КАЛІНІЧЕНКО Тетяни Валентинівни**  
 на тему «Розробка методу розходження суден з урахуванням повернення  
 на програмні траєкторії руху» в освітньому процесі Херсонській  
 державній морській академії

Ми, що нижче підписалися, Нагрибельний Я.А., Носов П.С., Онишко Д.М., склали цей акт в тому, що результати наукових досліджень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії здобувача Калініченко Т.В. на тему «Розробка методу розходження суден з урахуванням повернення на програмні траєкторії руху» впроваджені в освітній процес, кафедри Суднових комп'ютерних систем та мереж, а саме:

1) метод оперативного управління судном під час виходу на програмну траєкторію за станом поточної ситуації – при викладанні освітніх компонент: «Суднові технічні засоби навігації та зв'язку» (для здобувачів наукового ступеню магістр) та «Навігаційні інформаційні системи» (для здобувачів наукового ступеню бакалавр);

2) використання стенду імітаційного моделювання на базі навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000 для розробки і відпрацювання комп'ютерного моделювання безпечного повернення суден на програмні траєкторії руху – при викладанні освітніх компонент: «Навігаційні інформаційні системи» (для здобувачів наукового ступеню бакалавр) для моніторингу якості виконання лабораторних робіт здобувачами освіти.

Декан факультету  
 Судноводіння

д.п.н., професор Ярослав НАГРИБЕЛЬНИЙ

Завідувач кафедри  
 «Суднових комп'ютерних  
 систем та мереж»

к.т.н., доцент Павло НОСОВ

Старший викладач кафедри  
 «Суднових комп'ютерних систем та мереж»

Дмитро ОНИШКО



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**  
 (ДУІТ)


Вул. Кирилівська, 9 м. Київ, 04071 тел./факс: (044) 463-74-70, 482-51-26

E-mail: duit@duit.edu.ua Код ЄДРПОУ 41330257

«07» 01 2025 № 06/01-11

**УЗГОДЖЕНО**


Проректор з науково-педагогічної роботи

 **Юрій ДУДНИК**



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Голова комісії з реорганізації  
 ДУІТ

 **Олександр ГРИЩУК**

**АКТ**

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи  
**КАЛІНІЧЕНКО Тетяни на тему «Розробка методу розходження суден з урахуванням повернення на програмні траскторії руху»**

Цей акт складено про те, що результати наукового дослідження за темою дисертаційної роботи КАЛІНІЧЕНКО Тетяни Валентинівни «Розробка методу розходження суден з урахуванням повернення на програмні траскторії руху», а саме метод оперативного управління судном та метод розходження суден з урахуванням повернення на програмні траскторії руху використовуються у навчальному процесі факультету судноводіння на кафедрі навігації і управління суднами при викладанні дисциплін «Управління судном» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти та «Управління морехідними якістьми судна» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт.

В.о. директора Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, доктор технічних наук, професор



**Олена ТИМОЩУК**

Декан факультету судноводіння, кандидат юридичних наук, доцент



**Олександр СЛІСАЗАРОВ**

ITM UKRAINE LTD  
Off. 2, 5, Lidersovskiy Blvd.  
Odessa, 65014, Ukraine  
Tel office: +38(093)2873353  
Mobile: +38(067)4803819  
E-mail:  
operation@itmgroup.net  
www.itmgroupukraine.net



ТОВ «ІТМ УКРАЇНА»  
Україна, 65014, м. Одеса,  
Лідерсовський бульвар 5,  
оф. 2  
Тел. +38(093)2873353  
Моб. +38(067)4803819  
E-mail:  
operation@itmgroup.net  
www.itmgroupukraine.net

Вих.: 621-30/09  
Дата: 30.09.2024

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
**Калініченко Тетяни Валентинівни**  
на тему «Розробка методу розходження суден з урахуванням  
повернення на програмні траєкторії руху»  
на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності  
271 – Морський та внутрішній водний транспорт

Цім актом підтверджується впровадження методу оперативного управління судном та методу розходження судна з урахуванням повернення на програмні траєкторії, що розроблені в дисертаційній роботі КАЛІНІЧЕНКО Тетяни Валентинівни на тему «Розробка методу розходження суден з урахуванням повернення на програмні траєкторії руху».

Зазначені методи використовуються при підготовці та перепідготовці офіцерів-судноводіїв, працюючих на суднах Компанії ТОВ «ІТМ УКРАЇНА».

Директор  
ТОВ «ІТМ УКРАЇНА»



А. В. Науменко