

Національний університет "Одеська морська академія "
Міністерства науки і освіти України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Калініченко Григорій Євгенович

УДК 656.61.052

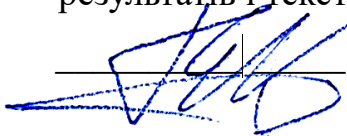
ДИСЕРТАЦІЯ

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН
З УРАХУВАННЯМ ЇХ ДИНАМІКИ ТА
НАВІГАЦІЙНИХ ПЕРЕШКОД**

Спеціальність 05.22.13 - навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
(271-Річковий та морський транспорт)

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



Калініченко Г.Є.

Науковий керівник - к. т. н., доцент Бурмака І.О.

Одеса – 2018

АНОТАЦІЯ

Калініченко Г.Є. Вдосконалення методів розходження суден з урахуванням їх динаміки та навігаційних перешкод. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271-Річковий та морський транспорт). - Національний Університет "Одеська морська академія", Одеса, 2018.

Аналіз огляду літературних джерел, присвячених основним напрямкам вирішення проблеми зниження аварійності суден шляхом забезпечення безпеки судноводіння показав, що основними напрямками рішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння є розробка методів моделювання руху судна при плаванні в стислих районах, що сприяє їх більш ефективному і безпечному плаванню та попередження зіткнень суден у прибережних районах плавання.

Проведений аналіз дозволив одержати висновок про те, що центральним напрямом рішення вказаної проблеми є вдосконалення методів попередження зіткнень суден в ситуаціях їх небезпечних зближень у процесі їх розходження.

В розділі запроваджено обґрунтування основного напрямку дисертаційного дослідження, який присвячений розробці способу урахування динаміки суден, що зближаються, та навігаційних перешкод в районі маневрування при формуванні областей небезпечних значень їх курсів та визначенні параметрів маневру розходження суден.

Розроблена технологічна карта дослідження, яка включає мету дисертаційного дослідження та його головну задачу, що розділена на три

незалежні складові задачі. Сформульована і підтверджена гіпотеза наукового дослідження, також показано, що в результаті рішення незалежних складових задач одержані відповідні наукові результати дисертаційної роботи. Приведені результати роботи, яким притаманна наукова новизна, і виділені положення дослідження, що одержані вперше.

Значущість і практична цінність дисертаційного дослідження, які обумовлюють можливість впровадження практичних рекомендацій, одержаних в дисертаційній роботі, а також сформульоване наукове положення роботи.

Окремим підрозділом коротко розглянута методика рішення складових задач, поставлених в дисертаційній роботі. Слід зазначити, що розглянута методика являється не стільки описом основних етапів виконання наукового дисертаційного, скільки є узагальненим алгоритмом виконання дисертаційного дослідження. При цьому отримані теоретичні розробки з використанням сучасних методів аналітичного аналізу та проведено імітаційне комп'ютерне моделювання для підтвердження коректності одержаних теоретичних результатів в частині розробки способів і процедур визначення параметрів безпечних маневрів розходження суден.

В основній частині роботи розглянуто мінімальну динамічну систему, поточний стан якої залежить від керуючих впливів обох суден. Проведено формалізацію мінімальної динамічної системи, розглянуто простір істинного руху суден системи і простір відносного руху. Отримано аналітичні вирази перетворення параметрів дійсного руху в параметри відносного руху, також наведені зворотні перетворення відносних параметрів в справжні параметри.

Розглянуто ситуаційні збурення, які виникають при небезпечному зближенні суден. Показано, що ситуаційні збурення можуть приймати два значення, які визначають стандартне маневрування і екстрене маневрування при надмірному зближенні.

Наведено поняття області небезпечних курсів мінімальної динамічної системи. Показано, що при різних співвідношеннях швидкостей суден міні-

мальної динамічної системи області небезпечних курсів можуть приймати різні форми. Розглянуто використання області небезпечних курсів для вибору безпечного маневру розходження зміною курсів.

В роботі розглянуто питання врахування інерційності при повороті суден, що небезпечно зближаються, і наявності навігаційних небезпек в районі їх маневрування при формуванні області небезпечних курсів суден. Показано, що через інерційність суден при їх повороті дистанція найкоротшого зближення виявляється менше розрахункової, тому при побудові області небезпечних курсів її межі розраховуються для гранично-допустимої дистанції зближення, яка збільшена на величину втрати дистанції найкоротшого зближення через інерційність судна. Запропоновано процедури обчислення збільшення гранично-допустимої дистанції методом послідовних наближень для різних моделей обертального руху судна. Розроблено комп'ютерну програму розрахунку меж області небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден і уточнено процедуру вибору безпечних курсів ухилення суден для розходження. Наведено чисельні приклади.

Розглянуто урахування навігаційних небезпек при виборі маневру розходження суден за допомогою області небезпечних курсів. Отримані вирази для розрахунку граничних курсів ухилення суден при наявності різних типів навігаційних небезпек: точкових, розподілених лінійних і складних розподілених. Показано відображення граничних курсів ухилення разом з областями небезпечних курсів і розроблено процедуру вибору безпечних курсів ухилення суден для розходження з урахуванням обмежень, що виникають через наявність навігаційних небезпек. Наведено необхідні чисельні приклади.

Для перевірки коректності одержаного в дисертаційній роботі способу вибору безпечного маневру розходження розглянута імітаційна комп'ютерна програма, приведено її опис для перевірки коректності теоретичних результатів дисертаційної роботи, а також представлено результати імітаційного мо-

делювання процесів розходження суден в різних ситуаціях небезпечного зближення.

Показано, що імітаційна програма містить два основних модуля: модуль генерування початкової ситуації небезпечного зближення суден з наявністю навігаційної небезпеки різного типу і вибір безпечних курсів ухилення в генерованій ситуації, а також модуль відтворення обраного маневру розходження зміною курсів.

За допомогою першого модуля формується ситуація небезпечного зближення суден, причому є можливість в початкову ситуацію ввести точкову або лінійну розподілену навігаційну небезпеку. Для генерованої початкової ситуації небезпечного зближення програмою формується область небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден при повороті, а при наявності навігаційної небезпеки відображаються навігаційні обмеження на курси ухилення суден. Після вибору оператором безпечних курсів ухилення суден використовується другий модуль для відтворення маневру розходження.

Відтворення маневру є анімаційним відображенням процесу розходження і виведенням поточних значень основних його параметрів. Аналізуючи процес розходження, робиться висновок про коректність обраних маневрів ухилення суден. Представлені в роботі результати відтворення маневрів ряду ситуацій небезпечного зближення показують коректність запропонованого способу вибору курсів ухилення суден з урахуванням їх інерційності і наявної навігаційної небезпеки.

Наукова новизна отриманих в дисертації результатів полягає в створенні нового методу вибору оптимального маневру розходження суден зміною курсів, що реалізований в комп'ютерному модулі із застосуванням області небезпечних значень курсів з урахуванням динаміки судна та навігаційних перешкод.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблено динамічну послідовність руху пари суден на повороті при формуванні області небезпечних значень їх курсів;
- отримав подальший розвиток алгоритм визначення меж області небезпечних значень курсів суден з урахуванням навігаційної перешкоди;
- удосконалено процес візуального відображення області небезпечних значень курсів суден та вибору маневру безпечного розходження під час руху при наявності навігаційних перешкод.

Практичне значення властиве проведеному дисертаційному дослідженню полягає у тому, що його результати можуть бути впроваджені на судна для попередження зіткнень, а також використані розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для зовнішнього управління суднами.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження від 01.06.2018 р.), компанією «MSC Shipmanagement Ltd, Cyprus» для навчання офіцерів навігаційної вахти за предметами «Навігація у обмеженому водному просторі» та «Менеджмент команди на мостіку» (акт впровадження від 15.06.2018 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі НУ «ОМА» при викладанні дисципліни «Маневрування та управління судном» (акт від 19.06.2018 р.).

Ключові слова: безпека судноводіння, попередження зіткнень суден, області небезпечних значень курсів суден, інерційність суден, навігаційні перешкоди.

Основні результати дисертаційного дослідження здобувача опубліковані в наступних наукових працях:

Основні наукові результати дисертації.

1. Бурмака И.А. Взаимодействие судов с компенсацией ситуационного возмущения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Проблемы техники: Научно-производственный журнал. - 2014. № 1 . – С 89 - 93.

2. Бурмака И.А. Учет динамики судна при плавании в стесненных водах/ Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Саков В.А.// Проблемы техники: Научно-производственный журнал. - 2014. № 4 . – С 48 - 54.

3. Бурмака И.А. Основные характеристики группы судов при внешнем управлении процессом судовождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А.// Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 - С. 35-41.

4. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения/ Бурмака И.А., Калиниченко Г. Е., Кулаков М. А.// Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2016. – выпуск 3 (37). – С. 64 - 71.

5. Кулаков М. А. Использование областей опасных скоростей для выбора маневра расхождения судов/ Кулаков М. А., Калиниченко Г.Е., Петриченко Е. А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22. – С. 62 – 65.

6. Бурмака И.А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 56 - 60.

7. Калиниченко Г. Е. Учет динамических характеристик судов при формировании области их опасных курсов/ Калиниченко Г. Е. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 28-34.

8. Калиниченко Г. Е. Учет навигационных опасностей при выборе маневра расхождения с помощью области опасных курсов / Калиниченко Г. Е. // XXX Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 декабря 2017г. – Харьков – С. 22 - 29.

9. Калиниченко Г. Е. Формирование области опасных курсов судов с учетом их динамических характеристик/ Калиниченко Г.Е., Пасечнюк С.С. // Автоматизация судовых технических средств. – 2017. – № 23. – С. 44-51.

10. Калиниченко Г.Е. Учет динамических характеристик судна при расчете момента времени его поворота на программный курс // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 1 . – С 118 - 122.

11. Калиниченко Г.Е. Учет инерционности судна при формировании области опасных курсов / Калиниченко Г.Е. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017.- С. 71 - 75.

12. Бурмака И.А. Методы внешнего управления судами в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е. // Херсон, 2017 / №2 (17) – С. 23 – 27.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

13. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е.,Сааков // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса : ОНМА, 2014. – С. 110-112.

14. Бурмака И.А. Учет инерционности судна и навигационных опасностей при расчете опасных областей курсов/ Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е.// Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса : ОНМА, 2015. – С. 114-115.

15. Калиниченко Е.В. Имитационное моделирование активного торможения судна с учетом течения/ Калиниченко Е.В., Калиниченко Г.Е. // Сучасні

інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 106-109.

16. Калиниченко Г. Е. Анализ условия сближения судов / Калиниченко Г. Е., Кулаков М.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 122–125.

17. Калиниченко Г. Е. Учет точечной навигационной опасности при использовании области недопустимых курсов судов / Калиниченко Г. Е. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 91–93.

18. Бурмака И. А. Определение допустимого множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И. А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.М. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 17-18 травня 2017 р. – Миколаїв : МУК, 2017. – С. 21–23.

19. Казак Ю.В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / Казак Ю.В., Калиниченко Г.Е. // Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : НУ «ОМА», 2017.

ANNOTATION

Kalinichenko G.Ye. Perfection of methods of divergence of ships by the account of their dynamics and navigation obstacles. It is Qualifying scientific labor on rights for a manuscript. Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences (Ph.D.) after speciality 05.22.13 - navigation and traffic control (271-river and marine transport). It is the National University "Odessa marine academy", Odessa, 2018.

Analysis of review of the literary sources, devoted to basic directions of decision of problem of decline of accident rate of ships by providing of safety of navigation showed that development of methods of design of motion of ship at sailing in the compressed districts is basic directions of decision of problem of providing of safety of navigation, that is instrumental in their more effective and safe sailing and warning of collisions of ships in the off-shore districts of sailing.

The conducted analysis allowed getting a conclusion that perfection of methods of warning of collisions of ships in the situations of their dangerous rapprochements at the external process control of divergence is central direction of decision of the indicated problem.

In a section it is inculcated straight ground basic dissertation research, which is devoted to development of method of account of dynamics of ships, which are drawn together, and navigation obstacles, in the district of maneuvering at forming of regions of dangerous values of their courses and determination of parameters of maneuver of divergence at his external management.

Developed technological card of research, which includes the purpose of dissertation research and his main task, which is parted on three independent component tasks. Formulated and confirmed hypothesis of scientific research, it is also shown that as a result of decision of independent component tasks the got

proper scientific dissertation job performances. Resulted job performances, to which inherent scientific novelty, and selected positions of research, that is got first.

Meaningfulness and practical value of dissertation research, which stipulate possibility of introduction of the practical recommendations, got in dissertation work, and also the formulated scientific position of work.

By separate subsection the shortly considered method of decision of the component tasks put in dissertation work. It should be noted that the considered method is not so much description of basic stages of implementation of scientific dissertation, as is the generalized algorithm of implementation of dissertation research. Thus got theoretical developments with the use of modern methods of analytical analysis and the imitation computer design is conducted for confirmation of correctness of the got theoretical results in part of development of methods and procedures of determination of parameters of safe maneuvers of divergence of ship with the use of principle of external management.

The minimum dynamic system is considered in basic part of work, current status of which depends on the managing influencing of both ships. Formalization of the minimum dynamic system is conducted, considered space of veritable motion of ships of the system and space of relative motion. Analytical expressions of transformation of parameters of actual motion are got in the parameters of relative motion, also resulted reverse transformations of relative parameters in the real parameters.

Situation indignations which arise up at dangerous rapprochement of ships are considered. It is shown that situation indignations can take on two values which determine the standard maneuvering and urgent maneuvering at surplus rapprochement.

The concept of region of dangerous courses of the minimum dynamic system is resulted. It is shown that at different correlations of speeds of ships of the minimum dynamic system of region of dangerous courses can take different forms. The

use of region of dangerous courses is considered for the choice of safe maneuver of divergence by the change of courses.

In work the question of account of inertia is considered at the turn of ships, which are dangerously drawn together, and presence of navigation dangers, in the district of their maneuvering at forming of region of dangerous courses of ships. It is shown that through inertia of ships at their turn distance of the shortest rapprochement appears less calculation, therefore at construction of region of dangerous courses its scopes settle accounts for maximum-possible distance of rapprochement, which is megascopic on the size of loss of distance of the shortest rapprochement through inertia of ship. Procedures of calculation of increase of maximum-possible distance are offered by the method of progressive approximations for different models of rotatory motion of ship. The computer program of calculation of scopes of region of dangerous courses is developed taking into account inertia of ships and specified procedure of choice of safe courses of deviation of ships for divergence. Numeral examples are resulted.

The account of navigation dangers is considered at the choice of maneuver of divergence of ships by the region of dangerous courses. Got expressions for the calculation of maximum courses of deviation of ships at presence of different types of navigation dangers: point, distributed linear and difficult distributed. The reflection of maximum courses of deviation is shown together with the regions of dangerous courses and developed procedure of choice of safe courses of deviation of ships for divergence taking into account limitations which arise up through the presence of navigation dangers. Necessary numeral examples are resulted.

For verification of correctness of the method of choice of safe maneuver of divergence got in dissertation work the considered imitation computer program, its description is resulted for verification of correctness of theoretical dissertation job performances, and also represented the results of imitation design of processes of divergence of ships in different situations of dangerous rapprochement.

It is shown that the imitation program contains two basic module: module of generation of initial situation of dangerous rapprochement of ships with the presence of navigation danger of a different type and choice of safe courses of deviation at a generating situation, and also module of recreation of select maneuver of divergence by the change of courses.

By the first module the situation of dangerous rapprochement of ships is formed, thus there is possibility in an initial situation to enter the point or linear distributed navigation danger. For the generating initial situation of dangerous rapprochement the program forms the region of dangerous courses taking into account inertia of ships at a turn, and at presence of navigation danger navigation limitations on the courses of deviation of ships are represented. After the choice the operator of safe courses of deviation of ships uses the second module for the recreation of maneuver of divergence.

The recreation of maneuver is the animation reflection of process of divergence and destroying of current values of basic his parameters. Analyzing the process of divergence is drawn conclusion about correctness of select maneuvers of deviation of ships. The results of recreation of maneuvers of row of situations of dangerous rapprochement represented in work show correctness of the offered method of choice of courses of deviation of ships taking into account their inertia and present navigation danger.

The scientific novelty of the results got in dissertation consists in creation of a new method of choice of optimum maneuver of divergence of ships by the change of courses, that realized in the computer module and which differs by principle of external process and application of region of dangerous values of courses control of divergence taking into account the dynamics of ship and navigation obstacles.

In dissertation work:

- procedure of account of dynamics of ship is first developed at a turn in time forming of region of dangerous values of courses of pair of ships;

- the method of calculation of scopes of region of dangerous values of courses of ships is first offered taking into account the navigation obstacles;
- first got procedure of graphic reflection of region of dangerous values of courses of ships and choice of maneuver of divergence taking into account the dynamics of ship and navigation obstacles.

The practical value peculiar to the conducted dissertation research consists in that his results can be inculcated on ships for warning of collisions, and also used by the developers of the navigation informative systems intended for the external management by ships.

The practical results of dissertation research are inculcated by private higher educational establishment Institute of post graduate education «Odessa marine trainer center» for preparation of navigators (act of introduction from 01.06.2018), by the crewing company « MSC Shipmanagement Ltd, Cyprus» for studies, preparation and retraining of officers of marine ships to direction of «Navigator» with the purpose of providing of safety of navigation and bridge team management (act of introduction from 15.06.2018). Materials of dissertation research are used in an educational processes in discipline «Maneuverability and navigation of the vessel» (act from 19.06.2018).

Keywords: safety of navigation, warning of collisions of ships, external management, regions of dangerous values of courses of ships, inertia of ships, navigation obstacles.

The basic results of dissertation research of bread-winner are published in the following scientific labors:

Basic scientific results of dissertation.

1. Бурмака И.А. Взаимодействие судов с компенсацией ситуационного возмущения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 1 . – С 89 - 93.

2. Бурмака И.А. Учет динамики судна при плавании в стесненных водах/ Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Саков В.А.// Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 4 . – С 48 - 54.

3. Бурмака И.А. Основные характеристики группы судов при внешнем управлении процессом судовождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А.// Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 - С. 35-41.

4. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения/ Бурмака И.А., Калиниченко Г. Е., Кулаков М. А.// Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2016. – выпуск 3 (37). – С. 64 - 71.

5. Кулаков М. А. Использование областей опасных скоростей для выбора маневра расхождения судов/ Кулаков М. А., Калиниченко Г.Е., Петриченко Е. А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22. – С. 62 – 65.

6. Бурмака И.А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 56 - 60.

7. Калиниченко Г. Е. Учет динамических характеристик судов при формировании области их опасных курсов/ Калиниченко Г. Е. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 28-34.

8. Калиниченко Г. Е. Учет навигационных опасностей при выборе маневра расхождения с помощью области опасных курсов / Калиниченко Г. Е. // XXX Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 декабря 2017г. – Харьков – С. 22 - 29.

9. Калиниченко Г. Е. Формирование области опасных курсов судов с учетом их динамических характеристик/ Калиниченко Г.Е., Пасечнюк С.С. // Автоматизация судовых технических средств. – 2017. – № 23. – С. 44-51.

10. Калиниченко Г.Е. Учет динамических характеристик судна при расчете момента времени его поворота на программный курс // Проблемы техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 1 . – С 118 - 122.

11. Калиниченко Г.Е. Учет инерционности судна при формировании области опасных курсов / Калиниченко Г.Е. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017.- С. 71 - 75.

12. Бурмака И.А. Методы внешнего управления судами в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е. // Херсон, 2017 / №2 (17) – С. 23 – 27.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

13. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е.,Сааков // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса : ОНМА, 2014. – С. 110-112.

14. Бурмака И.А. Учет инерционности судна и навигационных опасностей при расчете опасных областей курсов/ Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е.// Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса : ОНМА, 2015. – С. 114-115.

15. Калиниченко Е.В. Имитационное моделирование активного торможения судна с учетом течения/ Калиниченко Е.В., Калиниченко Г.Е. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 106-109.

16. Калиниченко Г. Е. Анализ условия сближения судов / Калиниченко Г. Е., Кулаков М.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 122–125.

17. Калиниченко Г. Е. Учет точечной навигационной опасности при использовании области недопустимых курсов судов / Калиниченко Г. Е. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 91–93.

18. Бурмака И. А. Определение допустимого множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И. А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.М. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 17-18 травня 2017 р. – Миколаїв : МУК, 2017. – С. 21–23.

19. Казак Ю.В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / Казак Ю.В., Калиниченко Г.Е. // Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : НУ «ОМА», 2017.

ЗМІСТ

	Стр.
ВСТУП.....	20
 РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНО- ВОДІННЯ ТА СУЧАСНІ НАПРЯМКИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ.....	25
1.1. Огляд літературних джерел за проблемою забезпечення безаварій- ного плавання морських суден.....	25
1.2. Вибір напрямку дисертаційного дослідження.....	48
1.3. Висновки по першому розділу.....	49
 РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОРЕКТНОСТІ ДИ- СЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	51
2.1. Обґрунтування вибору теми наукового дослідження.....	51
2.2. Використання методів дослідження дисертаційної роботи.....	53
2.3. Опис методики проведення дисертаційного дослідження.....	57
2.4. Висновки по другому розділу.....	58
 РОЗДІЛ 3. ВИБІР МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН МІНІМАЛЬНОЇ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	62
3.1. Мінімальна динамічна система та її характеристики	62
3.2. Область небезпечних курсів мінімальної динамічної системи.....	79
3.3. Врахування в першому наближенні навігаційних небезпек і інер- ційності судна при виборі маневру розходження зміною курсу...85	85
3.4. Висновки за третім розділом.....	97
 РОЗДІЛ 4. ФОРМУВАННЯ ОБЛАСТІ НЕБЕЗПЕЧНИХ КУРСІВ З УРА- ХУВАННЯМ ІНЕРЦІЙНОСТІ СУДНА І НАВІГАЦІЙНИХ НЕБЕЗПЕК.....	104
4.1. Вплив інерційності судна при повороті на форму області небезпеч- них курсів пари суден.....	104
4.2. Врахування навігаційних небезпек при виборі маневру розходжен- ня за допомогою області небезпечних курсів суден.....	119

4.3. Висновки за четвертим розділом.....	137
РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	147
5.1. Опис комп'ютерної інформаційної системи вибору маневру розходження суден зміною курсу з урахуванням інерційності суден при повороті і навігаційних небезпек.....	160
5.2. Перевірка коректності отриманих результатів імітаційним моделюванням.....	185
5.3. Висновки за п'ятим розділом.....	199
ВИСНОВКИ.....	200
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	202
ДОДАТОК А. Фрагмент лістингу програми розрахунку безпечного маневру розходження.....	218
ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації.....	255
ДОДАТОК С. Акти упровадження результатів дисертації.....	258

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема підвищення безаварійності судноводіння являється однією з найважливіших проблем безпеки мореплавання, так як її успішне рішення веде до охорони людського життя на морі, зменшення збитків майну і виробничим процесам, зниження шкоди навколишньому середовищу.

Плавання морських суден в умовах обмеженого простору ускладнюють інтенсивне судноплавство та навігаційні небезпеки, які створюють передумови для виникнення аварійних ситуацій. В стислих районах плавання навігаційна ситуація підлягає швидким змінам, тому необхідна розробка сучасних простих в використанні методів оцінки небезпеки зближення та вибору маневру розходження з використанням комп'ютерних інформаційних технологій. Тому розробка сучасних способів управління процесом розходження суден, що небезпечно зближуються, чому присвячена дана робота, є актуальним науковим напрямом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р), рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16.05.2008 р. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. №463 / 2008), а також в рамках планів наукових досліджень національного університету "Одеська морська академія" за держбюджетною темою "Забезпечення безпеки судноводіння в стислих районах плавання" (№ ГР 0115U003580, 2016 р.), в якій здобувачу належить виконаний підрозділ.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження являється забезпечення безаварійності судноводіння шляхом вдосконалення методів попередження зіткнень суден розробкою способу вибору оптимального

маневру їх розходження зміною курсів за допомогою області небезпечних значень курсів в залежності від динаміки суден.

Науковою гіпотезою дисертаційного дослідження є допущення про можливість підвищення оперативності і простоти вибору маневру розходження судна з небезпечною ціллю зовнішнім управлінням процесом розходження зміною курсів.

Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів і програми визначення параметрів маневру розходження суден маневром зміни їх курсів із застосуванням принципу зовнішнього управління.

Вирішення головної задачі дисертації потребувало методами теорії дослідження операцій її декомпозиції на незалежні складові задачі. Попереднім аналізом було виявлено доцільним розділити головну задачу дисертаційного дослідження на наступні три незалежні складові задачі:

1. Вплив урахування динаміки судна при повороті на форму і розміри області небезпечних значень курсів пари суден.
2. Урахування навігаційних перешкод в разі вибору маневру розходження з допомогою області небезпечних значень курсів суден.
3. Розробка графічного способу комп'ютерного відображення області небезпечних значень курсів суден і вибір з її допомогою оптимального маневру розходження.

Об'єктом дослідження дисертації є попередження зіткнення суден.

Предметом дослідження є методи вибору оптимального маневру розходження при зовнішньому управлінні процесом розходження суден.

Методи дослідження. Наступні методи були використані у дисертаційному дослідженні для пошуку рішень поставлених задач:

- дедукції при аналізі основних підходів вирішення проблеми безпеки судноводіння;
- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дисертації на незалежні складові задачі;

- системного аналізу для вибору теми дисертаційної роботи і при формуванні технології наукового дослідження;
- математичного аналізу для одержання рівнянь руху судна і пошуку залежності параметрів руху судна від керуючих впливів;
- аналітичної геометрії для формалізації області небезпечних курсів двох суден.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в створенні нового методу вибору оптимального маневру розходження суден зміною курсів, що реалізований в комп'ютерному модулі і який відрізняється принципом зовнішнього управління процесом розходження та застосуванням області небезпечних значень курсів з урахуванням динаміки судна та навігаційних перешкод.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблено динамічну послідовність руху пари суден на повороті при формуванні області небезпечних значень їх курсів;
- отримав подальший розвиток алгоритм визначення меж області небезпечних значень курсів суден з урахуванням навігаційної перешкоди;
- удосконалено процес візуального відображення області небезпечних значень курсів суден та вибору маневру безпечного розходження під час руху при наявності навігаційних перешкод.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що його результати можуть бути впроваджені на судна для попередження зіткнень, а також використані розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для зовнішнього управління суднами.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені приватним вищим навчальним закладом «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» для підготовки судноводіїв (акт впровадження від 01.06.2018 р.), компанією «MSC Shipmanagement Ltd, Cyprus» для навчання офіцерів навігаційної вахти за предметами «Навігація у обмеженому водному просторі» та «Менеджмент команди на мостіку» (акт впровадження від 15.06.2018 р.). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються

в навчальному процесі НУ «ОМА» при викладанні дисципліни «Маневрування та управління судном» (акт від 19.06.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертант виконав дисертаційну роботу самостійно: ним виконано аналіз основних підходів вирішення проблеми підвищення безпеки судноводіння і проведено інформаційний пошук в цьому напрямку, він обґрунтував методологічне забезпечення дослідження, розробив і виклав метод вибору маневру розходження суден при його зовнішньому керуванні з урахуванням динаміки суден та навігаційних перешкод, ним також розроблені необхідні алгоритми, що дозволяють формування комп'ютерної системи вибору безпечного маневру розходження, здобувачем виконано імітаційне моделювання, впроваджені результати роботи в виробничий процес. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використані лише ті положення, які належать автору особисто: дослідження взаємодії суден в стандартній ситуації небезпечного зближення [111], використання кінематичної моделі повороту судна [112], визначення зовнішнього керування процесом судноводіння [113], процедура оцінки небезпечності ситуації зближення суден [114], використання області небезпечних курсів для вибору маневру розходження [115], вплив моделі обертального руху судна на форму області небезпечних курсів [118], урахування динаміки суден при формуванні області небезпечних курсів [120], процедура формування області небезпечних курсів [123,124], урахування навігаційних перешкод при виборі маневру розходження [125], вплив течії на гальмування судна [126], визначення рівня ситуативного збурення [127], умова існування допустимої множини маневрів розходження [129], вплив моделі обертального руху судна на похибку у визначенні дистанції найкоротшого зближення [130].

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях: науково-технічна конференція "Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні" (Одеса, 18-19 листопаду 2014 р.), науково-технічна конференція "Морські

перевезення та інформаційні технології в судноплавстві" (Одеса, 19-20 листопада 2015 р.), VI Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)» (Херсон, 26-28 травня 2015 р.), VIII Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016)» (Херсон, 24-26 травня 2016 р.), IX Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017)» (Херсон, 23-25 травня 2017 р.), Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Миколаїв, 17-18 травня 2017 р.), XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке» (Харків, 15 вересня 2017 р.), XXX Международная конференция «Развитие науки в XXI веке» (Харків, 15 грудня 2017 р.), науково-технічна конференція «Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека» (Одеса, 16-17 листопада 2017 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 18 наукових праць (з них 5 одноосібно), в тому числі: в наукових профільних виданнях, що входять до переліку МОН України - 7 наукових статей [111, 112, 113, 118, 120, 121, 123]; в зарубіжних наукових профільних виданнях - 3 наукові статті [114, 115, 122]; в збірниках матеріалів наукових конференцій - 9 доповідей [116, 119, 124-130].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (134 найменувань) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 241 сторінка і містить 89 рисунків, зокрема: 181 сторінка основного тексту, 16 сторінок списку використаних джерел, 44 сторінки додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ ТА СУЧАСНІ НАПРЯМКИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ.

1.1. Огляд літературних джерел за проблемою забезпечення безаварійного плавання морських суден.

Проведено аналіз літературних джерел щодо проблеми забезпечення і підвищення безпеки судноводіння, з якого витікає, що двома найбільш актуальними напрямками рішення цієї проблеми являються:

- зниження аварійності суден у прибережних районах інтенсивного судноплавства шляхом розробки ефективних і оперативних методів попередження зіткнень суден;
- використання інформаційно-управляючих технологій судноводіння для моделювання руху судна при плаванні в стислих районах і вибору коректних маневрів, що підвищує безпеку плавання.

Найбільш ефективною мірою підвищення безпеки судноводіння є попередження зіткнень суден в прибережних районах інтенсивного судноплавства. Роботи [1-88] присвячені питанням вирішення проблеми попередження зіткнень суден.

Різні аспекти вирішення проблеми попередження зіткнень суден найбільш повно розглянуто в роботі [1], починаючи з аналізу концепцій управління суднами в ситуації небезпечного зближення. Концепція локально-незалежного управління процесом розходження передбачає, що кожне з суден приймає рішення про власний маневр розходження в рамках вимог МППЗС-72 в частині маневрування суден, виходячи з ситуації зближення з кожною із цілей. Другою концепцією передбачене повне управління системою суден, що зближаються, зовнішнім управлінцем з урахуванням всіх парних ситуацій

зближення суден, який визначає загальну стратегію розходження, що містить їх скоординовані маневри. В роботі [1] для кожної із концепцій розходження розроблені процедури вибору оптимальних безпечних стратегій розходження, які враховують навігаційні перешкоди і динаміку суден, що маневрують.

Локально-незалежне управління процесом розходження суден являється основним методом попередження зіткнення в даний час, чим і обумовлена та обставина, що основні дослідження по проблематиці попередження зіткнення суден присвячені розвитку даного методу.

Перші спроби осмислити і формалізувати проблему безпечного розходження суден для вживання належних заходів по ефективному попередженню зіткнень були зроблені біля сорока років тому. Особливу актуальність ця проблема прийняла в середині 70-х років через інтенсивне упровадження обчислювальної техніки на морському флоті.

Спочатку була зроблена спроба рішення задачі автоматизації процесу розходження суден методами теорії оптимального управління. Проте глибше вивчення даної проблеми привело до розуміння того, що процес розходження є керований двома учасниками, що викликало формування нового підходу до розуміння і формалізації процесу розходження, заснованої на методах теорії позиційних диференціальних ігор. З другого боку існуюча координація у вигляді МППЗС-72, регламентуюча взаємодію суден в процесі розходження, суперечить ігровій постановці задачі, що може бути подолане лише виходом за рамки ігрових моделей.

До перших досліджень проблеми розходження суден належать роботи [2-4], в яких розглядалось розходження судна з поодинокі ціллю при відсутності навігаційних перешкод. В роботах приведені аналітичні вирази, що характеризують допустимі області безпечних курсів і швидкостей зустрічних суден. Також одержані залежності між істинними і відносними параметрами

руху судна при відомих незмінних курсі та швидкості цілі. Рішення задачі одержано методами оптимального управління.

До теперішнього часу склався ряд підходів опису керованого процесу розходження суден з урахуванням основних істотних чинників, тому проведемо короткий аналіз основних концепцій формалізації процесу розходження і вибору безпечного маневру розходження, розглядаючи в першу чергу дослідження, виконані співробітниками Інституту Кібернетики ім. В.М. Глушкова АН України і викладені в роботах [5-18], які присвячені застосуванню методу нелінійної інтегральної інваріантності [5,6] для опису процесу розходження суден і створення системи попередження їх зіткнень.

При описі процесу судноводіння як зовнішнє збурення розглянуто 2n-мірний вектор швидкостей V і курсів K n зустрічних суден, що утруднюють рух базового судна, а інваріантними координатами вибрані відстані від базового судна до стрічних суден. Автор припускає, що за допомогою згаданого методу, задаючи можливі найгірші для процесу розходження значення V і K кожного із зустрічних суден, можна знайти допустиму область одно крокових стратегій базового судна, які забезпечують розходження зі всіма суднами на заданих допустимих відстанях, що не завжди є коректним.

Особливістю в такій постановці задачі синтезу системи попередження зіткнень суден є її властивість ергатичності [7], тобто ЕОМ формує область допустимих одно крокових маневрів, а судноводій проводить вибір, згідно зі своїм критерієм оптимальності.

Варіант можливої формалізації МППЗС-72, в частині маневрування по ухиленню судна від небезпечної цілі запропонований в роботі [8]. Формування допустимих областей маневру судна методом нелінійної інтегральної інваріантності, які забезпечують розходження з n цілями при найменш сприятливих початкових ситуаціях і параметрах їх руху, викладено в роботах [9-13]. У роботі [14] розглянута ієрархія цілей ергатичної системи управління судном, яка використовує метод нелінійної інтегральної інваріантності.

У роботах [15,16] обговорюється питання застосування маневрів розходження, що містять два елементи, тобто одночасна зміна курсу і швидкості або послідовна двократна зміна курсу базового судна через деякий інтервал часу. Проте метод нелінійної інтегральної інваріантності, розроблений для одноеlementних маневрів, не прийнятний для формування області допустимих двоелементних маневрів. Більш того, відсутній опис процедури або хоча б підходу виявлення ситуацій, при яких потрібне застосування двокрокових стратегій. Ще одним недоліком даного методу є відсутність врахування часу в явному вигляді.

Групою учених, що проводили дослідження з даної тематики було одержано авторське свідоцтво на винахід обчислювальної системи попередження зіткнень суден "Антикон" [17]. Результати математичного моделювання функціонування ергатичної системи попередження зіткнень суден приведені в роботі [18].

В роботах [19,20] запропоновано підхід до рішення задачі синтезу оптимального управління судна при розходження методами теорії оптимальних дискретних процесів. При постановці задачі передбачається відсутність зовнішніх збурень і незмінність швидкостей і курсів зустрічних суден. Враховуються обмеження по безпечному розходженню із зустрічними суднами, по максимальній зміні початкового курсу, бічному відхиленню і максимальній величині кутової швидкості.

Математичне формулювання задачі має наступний вигляд. В районі плавання знаходиться n суден A_j із заданими швидкостями V_j . Розходження базового судна A з рештою суден A_j вважається безпечним в інтервалі часу $[0-T]$, якщо дистанції найкоротших зближень зі всіма n судами A_j більші гранично допустимої дистанції d_0 .

У задачі розглядаються три критерії оптимальності: критерій мінімуму перекладань керма (МПК), критерій мінімального відхилення судна від зада-

ної траєкторії (МВТ) і критерій мінімального відхилення судна від заданого курсу (МВК).

На величину кутової швидкості судна накладаються обмеження. У разі потреби обмежуються поточні значення курсу і координат судна A . Управління судном проводиться шляхом зміни його кутової швидкості, яка розглядається як управляюча дія при незмінному модулі швидкості судна. Значення кутової швидкості, задовольняючи приведеним обмеженням, називаються допустимими управліннями.

Постановка задачі оптимізації формулюється таким чином. Серед допустимих управлінь $u(t)$ необхідно знайти оптимальне управління $u(t)_{op}$ і оптимальну траєкторію $x(t)_{op}$, які мінімізують функціонал:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \varphi^2(x, u, t) dt \Rightarrow \min,$$

де $\varphi = u(t)$, при використуванні критерію оптимальності МПК;

$\varphi = x_1(t)$, у разі вибору критерію оптимальності МВТ;

$\varphi = \gamma(t)$, для критерію оптимальності МВК.

Показано, що через аналітичний вид критерію оптимальності і обмежень, що накладаються, рішення задачі в явному вигляді неможливе і приводиться алгоритм її чисельного рішення, який використовує апарат теорії оптимальних дискретних процесів. Алгоритми пошуку оптимального управління $u(t)_{op}$ по кожному з критеріїв (МПК, МВТ, МВК) ідентичні і базуються на методі можливих напрямів, реалізованому на ЕОМ. Згідно алгоритмам спочатку знаходиться хоча б одне допустиме управління, щодо якого методом ітерацій здійснюється пошук оптимального управління без порушення прийнятих обмежень. При оновленні інформації задача розв'язується наново.

В роботах [21-24] опубліковані результати дослідження по оптимізації процесу розходження суден, які проводилися під керівництвом академіка Фрейдзона І.Р. Початковий етап досліджень [21] характеризується спробою

формалізації процесу розходження судна з n цілями методами теорії оптимального управління з урахуванням вимог МППЗС-72.

Рішення задачі розходження в роботі пропонувалося двохшкальною системою управління, яка дозволяє прогнозувати рух судна і небезпечних цілей при заданих збуреннях і різних управляючих діях. В цьому випадку по прийнятому критерію оптимальності можна визначити необхідні управляючі дії. Для визначення алгоритму управління використовується частина системи, що включає процедуру пошуку безпечного маневру, модель управляючого судна і моделі управляючих пристроїв, які працюють в режимі періодичного рішення задачі в прискореному масштабі часу. У роботі запропонована формалізація МППЗС, що враховує початкову відносну позицію судна і цілі і їх параметри руху. Модель МППЗС як вихід містить логічні змінні, які дозволяють визначати можливість зміни курсу управо і вліво, поступитися дорогою або зберегти параметри руху при допущенні, що параметри руху суден, з якими розв'язується задача розходження, незмінні, а гранично-допустимі дистанції найкоротшого зближення з суднами задані. Для кожного із зустрічних суден знаходиться допустима область курсів і швидкостей базового судна. Ця область розбивається на дві області по ознаці сторони зміни курсу судна (управо або вліво) по відношенню до початкового. Формалізація МППЗС-72 проводиться введенням логічної функції п'яти булевих змінних, які характеризують як відносне положення судна і цілі, так і параметри їх руху. Для кожного з суден вводиться характеристика небезпеки, залежна від дистанції і часу найкоротшого зближення.

Спочатку визначається допустима область для найбільш небезпечного судна, потім проводиться пошук загальної допустимої області, що є перетином вже знайденої області з допустимою областю наступного по небезпеці судна. Надалі процедура перетину допустимих областей з урахуванням вимог МППЗС-72 продовжується аж до останнього судна. За допомогою описаного алгоритму формується безпечна область курсів і швидкостей судна, яке вирі-

шує задачу розходження. Після формування області допустимих курсів і швидкостей слід вибрати оптимальний маневр, причому в роботі критерієм оптимальності являється проекція швидкості руху базового судна на напрям його програмного руху, а обмеженнями є лінійні нерівності, що формалізують безпечну розбіжність судна з кожною з цілей. Шуканим рішенням є пара ортогональних проекцій швидкості судна, задовольняюча вимозі оптимальності і лінійним обмеженням, причому для пошуку рішення пропонується використовувати метод лінійного програмування. Вибір оптимального безпечного маневру, тобто пари швидкості і курсу завершується пошуком відповідних значень управляючих дій (кута кладки керма і обертів двигуна) за допомогою моделі керованого руху судна, яка враховує динаміку базового судна.

Пропонованому підходу властиві недоліки (статичність задачі, один загальний маневр судна для розходження зі всіма n цілями, відсутність урахування навігаційних небезпек і т. п.), тому первинна модель надалі була значно доповнена, зберігши при цьому свої позитивні якості.

Розвиток аналізованої моделі здійснювався у напрямі використання методів позиційних диференціально-різницевих ігор і знайшов своє віддзеркалення в роботах [22-24]. Постановка модернізованої задачі зводиться до наступного. При будь-якій поточній позиції судну необхідно вибрати таку стратегію розходження, яка задовольняє умові переваги дистанції найкоротшого зближення над гранично-допустимою по відношенню до кожного із зустрічних суден. Стратегія також повинна враховувати обмеження фазового вектора по навігаційним небезпекам, не суперечити МППЗС-72 і забезпечити мінімальну відстань до порту призначення. Диференціальна гра замінюється багатокроковою з метою полегшення пошуку рішення задачі, при цьому передбачається постійність стратегії і параметрів руху зустрічних суден протягом одного кроку, тобто протягом заданого інтервалу часу.

Рішення задачі пошуку оптимальної стратегії розходження пропонується знаходити по наступному алгоритму. Залежно від позиції динамічної системи

спочатку визначається множина можливих стратегій кожного із зустрічних суден по відношенню до базового судна і допустима множина стратегій базового судна щодо кожного з них. Потім визначаються найменш сприятливі стратегії зустрічних суден, які максимально збільшують критерій оптимальності базового судна (відстань до порту призначення). З урахуванням поєднання таких найменш сприятливих стратегій зустрічних суден необхідно визначити область допустимих безпечних маневрів розходження базового судна, з якої вибирається конкретна стратегія, що є функцією позиції і мінімізує критерій оптимальності.

Як і в роботі [21], задача пошуку оптимальних значень позиційної стратегії редукується до задачі лінійного програмування, для чого лінеаризації піддаються нелінійні обмеження по безпеці розходження і урахуванню навігаційних небезпек. Пошук управляючих дій, значення яких максимально відповідають оптимальній стратегії розходження, пропонується проводити за допомогою моделі керованого судна аналогічно алгоритму, запропонованому в роботі [21].

Особливості розходження суден в морі способом зміщення на паралельну лінію шляху розглянуті в монографії [25]. В роботі для розходження використовується стратегія зміщення на паралельну лінію шляху під тим або іншим кутом до лінії програмного курсу. Оптимальна стратегія розходження вибирається з допустимої множини по комплексному критерію, який враховує вимоги до безпеки, помітності, завчасності та економічності маневру для запобігання зіткнення. Відмічається, що підвищення ефективності запобігання зіткнень суден може досягатися створенням нових алгоритмів та інтелектуальних систем.

В роботах [26-28] представлені дослідження ситуації небезпечного зближення судна з ціллю, в яких визначені умови існування множини безпечних

маневрів розходження, а також розглянуто процедуру вибору із множини безпечних маневрів оптимального маневру по критерію втрат ходового часу, які слід мінімізувати. Показана залежність стратегії розходження від області взаємних обов'язків суден, яка визначається вимогами МППЗС-72. Показано, що стратегія розходження складається із ділянки ухилення з програмної траєкторії руху та ділянки повернення на неї. Залежно від типу взаємодії суден оптимізація маневру розходження проводиться по різним критеріям оптимальності.

Стаття [29] присвячена вивченню надійності інформації про дистанцію і час найкоротшого зближення, одержаних за допомогою АІС судна. Згідно з рекомендацією ІМО, коли є дані цілей від АІС і радіолокаційного стеження, то вимагається виконувати критерії відповідності, які полягають у тому, що якщо одержана інформація від АІС і САРП для однієї цілі, то за умовчанням повинні автоматично вибиратися і відображатися тільки цільовий символ АІС та буквено-цифрові дані цілі АІС. У статті представлені дослідження, проведені в реальних умовах з достовірною інформацією, представленою АІС судна, про дистанцію і час найкоротшого зближення з іншим судном, оснащеним АІС, шляхом порівняння даних з АІС з даними, представленими САРП.

Урахування інерційності суден при виконанні повороту для визначення параметрів маневру безпечного розходження розглянуто в роботах [30-36], які присвячені використанню різних моделей обертального руху судна. Приведена найбільш проста кінематична модель повороту судна з постійною кутовою швидкістю, яка ускладнюється при формуванні більш адекватних реальному процесу повороту судна моделей шляхом використання диференціальних рівнянь другого та третього порядків відносно змінної курсу судна. Процедура розрахунку характеристик поворотності судна по матеріалам натурного експерименту запропонована в роботі [35], а результати імітаційного

моделювання процесу розходження суден з урахуванням їх динаміки приводяться роботи [36].

Стаття [37] присвячена опису чинників, які слід враховувати при визначенні безпечної швидкості судна, а також визначенню оптимальної швидкості для морських плавучих об'єктів, включаючи вказівки, що стосуються швидкості судна, які вказані в МППЗС-72, і рейсових чартерах. Запропоновані визначення наступних понять: маневрування суден, судноплавство, безпечна швидкість, максимально можлива швидкість для об'єктів морського плавання.

В роботі [38] наведено результати аналізу імітаційного моделювання процесу розходження суден і виявлені недоліки системи бінарної координації взаємодії суден, що міститься в МППЗС-72 стосовно маневрування суден в ситуації небезпечного зближення.

Метод оцінки ризику зіткнення з використанням режиму істинного руху розглядається і обговорюється в роботі [39]. Наголошується, що необхідно розробити корисний додаток для використовуваних даних АІС для забезпечення безпеки і ефективності роботи судна. АІС є системою придатної для збору інформації про цілі, але ця інформація поки використовується неефективно. Однією з причин можливого зіткнення суден є метод оцінки ризику зіткнень. Звичайно ризик зіткнення судна оцінюється по значенню параметрів точки найкоротшого зближення (СРА), яка пов'язана з відносним рухом. В цьому випадку при плаванні в обмежених водах важко знайти пропуск безпечної цілі. У статті вводяться лінія прогнозованого зіткнення (LORC) і зона перешкод по цілі (OZT) для оцінки ризику зіткнення, ці значення пов'язані з істинним рухом, і це дає можливість виявити ситуації небезпечного зближення і забезпечити безпечне плавання в обмежених водах.

Бінарні взаємодії суден, які виникають при їх небезпечному зближенні, викладені в роботі [40], розглянуті їх координованість та ефективність, для їх чисельної оцінки яких запропоновано процедуру та отримано необхідні ана-

літичні вирази. Показано, що МППЗС-72 являється бінарним координатором взаємодії пари суден при їх небезпечному зближенні та розглянута їх формалізація. Приведено математичну модель взаємодії групи суден, що небезпечно зближуються, та зовнішнє управління їх процесом розходження є допомогою стратегії зміни курсів.

У публікації [41] представлена модель доменів суден для запобігання їх зіткненню з ухваленням рішень за допомогою COLREG на основі поля штучного потенціалу. Розглянуті методи ухвалення рішень по запобіганню зіткненням з декількома судами і складання плану попереднього маршруту. У цьому документі пропонується повний набір рішень для запобігання зіткненню між декількома судами в інтелектуальній навігації, використовуючи організацію зверху «вниз» для структуризації системи. Система розроблена з двома рівнями: ухвалення рішень про запобігання зіткненням і планування маршруту. Відповідно до загальних вимог Міжнародних правил запобігання зіткненням (COLREG), аналіз ухвалення рішень про розподіл розподілених маршрутів для попередження зіткнень аналізується як для ситуацій, пов'язаних з рухомими суднами, так і для суден, що стоять, включаючи надзвичайні дії у разі відмови судна в ухиленні від вживання заходів по запобіганню зіткненням. Метод штучного потенційного поля (АПФ) використовується для планування шляху в деталях. Розроблений метод АПФ в поєднанні з моделлю судової області, що враховують швидкість і курс цільових суден, може точніше визначати рухомі характеристики перешкод. Результати проведеного моделювання показують, що запропонована система може працювати ефективно.

В роботах [42-44] запропонована розробка процедури врахування навігаційних перешкод в районі маневрування при визначенні параметрів безпечного маневру розходження судна з ціллю. Для ситуації наявності навігаційних перешкод в районі маневрування суден, що зближуються, в роботі [42] одержа-

на умова існування множини безпечних маневрів розходження, а в роботі [43] розглянуто рішення задачі розходження суден з урахуванням лінійної навігаційної перешкоди. Аналітичний опис навігаційних перешкод приведено в роботі [44] і встановлено, що навігаційні небезпеки розділяються на три типи: точкові навігаційні перешкоди, лінійні розподілені і складні розподілені навігаційні перешкоди.

Домен судна як критерій безпеки в зоні обережності схеми розділення трафіку є об'єктом розгляду роботи [45]. Наголошується, що судновий домен є одним з критеріїв оцінки безпеки судноплавства. Це особливо важливо в обмежених водах з інтенсивним рухом, де критерії дистанція найкоротшого зближення (СПА) і час найкоротшого зближення важко застосовувати. Дане дослідження продовжує вивчати судові домени в схемах розділення руху. У зв'язку із зміною порядку руху суден проаналізовані встановлені запобіжні засоби. Крім того, визначені судові домени у області обережності і вироблено порівняння їх з доменами суден, що йдуть смугами руху.

Взаємодія суден при їх небезпечному зближенні, пов'язана з визначенням взаємних обов'язків в процесі розходження, розглянута в роботі [46]. Викладена формалізація бінарної координації, що регламентує взаємодії суден згідно з вимогами МППЗС-72. Розроблено стратегію екстреного розходження для ситуації надмірного зближенні суден при невизначеності їх подальшої поведінки та відсутності координації.

Питання, пов'язані з ситуацією надмірного зближення суден та їх екстреного маневрування для розходження, детально досліджуються в роботах [47, 48], причому в публікації [47] розроблена процедура формування стратегії розходження суден в ситуації надмірного зближення, яка використовує особливості прийняття рішення в умовах невизначеності із застосуванням мінімаксних стратегій. В роботі [48] приведено спосіб урахування кутової шви-

дкості судна в разі визначення параметрів маневру розходження в ситуації надмірного зближення.

В роботі [49] наголошується, що судноплавний домен в даний час є важливим критерієм оцінки безпеки судноплавства. Його форма і розмір залежать від багатьох чинників. Доступна область маневрування представляється однією з найважливіших з них. У цій статті розглядається вплив доступної області маневрування на форму і розмір судових доменів у відкритому морі і обмежених водах. Дослідження проводилося з використанням методу моделювання. Експертні навігатори брали участь в симуляціях з використанням системи ECDIS. Проведено порівняння областей судових проходів у відкритому морі і забороненій зоні.

Різні способи попередження зіткнень суден розглянуто в роботі [50], до яких належать УКХ - радіо, радіолокаційні та оглядові. Також приведені більш просунуті способи: застосування домену судна, генетичного алгоритму та теорії нечітких множин, які коректні в ситуаціях бінарних взаємодій, але в ситуаціях небезпечного зближення групи суден їх застосування утруднене. Тому в роботі для попередження зіткнень суден запропоновано розподілений локальний Алгоритм пошуку (DLSA), який передбачає спілкування кількох суден один з одним в межах певної області на УКХ-радіо зв'язку. З допомогою інформації, отриманої від сусідніх суден, алгоритм DLSA обчислює ризик зіткнення.

У роботах [51, 52] показано застосування віртуальних областей для забезпечення плавання в стислих водах. В роботі [51] показана основна перевага віртуальної області, якою являється відображення судової безпечної зони з простору відносного руху в простір істинного руху, що визначає можливість її використання для безпечного розходження суден при наявності навігаційних перешкод в разі графічного зображення ситуації зближення на електрон-

ній карті, а процедура відображення віртуальної безпечної області судна на електронній карті приведена в роботі [52].

В роботах [53-55] формалізується процес управління рухом судна, як багатовимірний, з нелінійними і нестационарними характеристиками, причому задача вибору оптимального маневру розходження носить ігровий характер, тому формалізація і рішення цієї задачі являється дуже складним завданням, а в означених роботах показані шляхи його вирішення.

В роботах [56, 57] розглянуто спосіб формування суднової безпечної зони для забезпечення розходження суден в разі небезпечного зближення та виникненні загрози зіткнення. Запропоновані математичні моделі, що містять системне урахування істотних факторів, які впливають на розміри безпечної зони, яка орієнтована на практичне використання в процесі плавання судна в різних умовах.

У статті [58] приведені результати розробки аналітичного методу пошуку областей ризику з високим рівнем. Використовуючи дані для вимірювання цунамі, одержані АИС за один рік, було проаналізовано стан руху суден моделями, які засновані на моделі газу і зоні перешкод по Цельту (OZT). Використовуючи метод на основі моделі газу, можна проаналізувати площу з погляду відносного кута, розміру, швидкості і густини суден. OZT був розроблений з тим, щоб показати зону зіткнення на базовому судні. Використовуючи цей метод для аналізу морського руху суден, оцінюється висока вірогідність зіткнення. Крім того, судна, курс яких прямує в OZT, ідентифікуються і вивчаються їх положення, а також інтервал часу проходження курсом, прямуючий в OZT.

Теоретичне обґрунтування та зміст автономної суднової системи попередження зіткнення СА (Collision avoidance) викладається в роботі [59 104], в якій також приведено алгоритм розходження суден, що небезпечно зближується, та розглядаються вимоги до автономної навігації з урахуванням чинни-

ків, що впливають на процес розходження суден. Пропонована в роботі система СА базується на використанні штучного інтелекту, методами якого є еволюційні алгоритми, логіка фуззі, нейромережа та комбінація цих методів.

Індекс ризику зіткнення суден є основним показником можливості зіткнень суден, про що стверджується в роботі [60], в якій проведено аналіз і указуються переваги та недоліки різних методів розрахунку індексу ризику зіткнення суден. Недоліки моделі оцінки, запропонованої Kearon J, компенсує запропоновано модель оцінки ризику зіткнення суден на основі комплексної площини. Згідно розглянутої моделі, розрахунок індексу ризику зіткнення будується для ситуацій мультикоманд суден у вигляді тривимірного зображення просторової кривої індексу ризику. Реалізація запропонованої моделі потребує одиночний мікрокомп'ютерний чіп, який доцільно використовувати для системи прийняття рішень по забезпеченню безпечного судноводіння.

Базова модель процесу безпечного управління судном у ситуації загрози зіткнення на базі моделі гри N гравців представлена в роботі [61], причому модель включає нелінійні рівняння стану та переміні в часі обмеження змінних стану. В першому наближенні модель багатокрокової матричної гри у вигляді двоїстої задачі лінійного програмування була прийнята в якості моделі управління процесом розходження суден. Була розроблена комп'ютерна програма ігрового управління GSC у програмному забезпеченні Matlab / Simulink для визначення безпечної траєкторії розходження власного судна. Одержані аналітичні результати визначення безпечної траєкторії руху судна у реальній навігаційній обстановці були перевірені та підтверджені прикладами комп'ютерного моделювання із використанням програми GSC.

В роботах [62-64] викладені сучасні підходи формування системи координації взаємодії суден в ситуації небезпечного зближення, в яких розглянута система бінарної координації, яка регулює взаємодію пари суден в ситуації небезпечного зближення при їх стандартному маневруванні зміною курсу судна.

Наголошено, що при формуванні системи бінарної координації необхідно враховувати вимогу закону необхідної різноманітності Ешбі, для виконання якої одержані умови, які полягають в компенсації ситуативного збурення або обома суднами, або судном з більшою швидкістю.

Штучна нейрона мережа синтезу безаварійного управління в ситуаціях небезпечного зближення суден в морі та шість методів оптимальної теорії ігор розглянуто в статті [65]. Показано, що застосуванням оптимальних алгоритмів керування методами теорії ігор можливе визначення безпечної стратегії власного судна при розходженні з цілями для гарної та обмеженої видимості. Багатокрокові позиційні некооперативні та кооперативні ігри також були розглянуті в роботі, було приведені порівняння безпечного управління судном в ситуації небезпечного зближення за допомогою методів антагоністичної та кооперативної ігор. Приклади комп'ютерного моделювання ситуації зближення судна із вісьмома зустрічними цілями з метою визначення безпечних власних судових траєкторій розходження також були наведені в роботі.

Новий фузі-метод, як додаток до засобів можливості ухилення від зіткнення системи СУРС/АІС, запропонований в роботі [66]. Згідно з цим методом, данні СУРС спільно з даними АІС вводяться в Морську географічну інформаційну систему MGIS для розрахунку даних про область знаходження судна та інерційних сил, що діють на судно, яка також використовується для визначення захисного кола і небезпечного індексу. Точне прогнозування часу і позиції зіткнення може бути отримано з допомогою аналітичної моделі морської системи GIS. Користуючись запропонованим методом, оператор СУРС одержує можливість прийняття рішень щодо попередження зіткнення суден.

Контроль і управління рухом судна при його переході між портами розглядається у статті [67] в якості багаторівневої системи, яка керує судовими системами, причому судовим підсистемам відповідають функціональні шари контролю.

В роботах [68-71] розглянуто вибір маневру розходження зміною курсів або швидкостей декількох суден методами їх зовнішнього управління. Для цього запропоновані області неприпустимих значень параметрів руху суден, що небезпечно зближуються.

Вдосконаленню зовнішнього управління рухом суден в районах контролю СУРС присвячена робота [72], в якій з допомогою системи експертних знань на принципах повного зовнішнього управління процесом розходження суден засновані підходи формування безпечних траєкторій руху суден, що постачаються судноводіям та службам руху суден. В статті також аналізується процедура планування траєкторій руху суден із використанням спеціалізованих алгоритмів узгодження за допомогою попередніх домовленостей по досягненню рішення. Це рішення має бути прийнятним для всіх суден та відповідати вимогам правил запобігання зіткнень, враховувати динаміку суден та проведення переговорів для оптимізації траєкторій без втручання зовнішнього управління. Всі компоненти, необхідні для вирішення проблеми попередження зіткнення з декількома суднами, поєднуються в процедурі, яка тестується в даний час у моделюванні на декількох випробувальних стендах.

В роботах [73-75] розглянуто процедури формування небезпечної області курсів двох суден і використання їх для вибору безпечного маневру розходження, а процедура вибору маневру розходження трьох суден зміною курсів при їх зовнішньому управлінні приводиться в роботах [76-79].

В роботі [80] запропоновано спосіб вибору безпечних курсів ухилення суден при зовнішньому управлінні за допомогою областей небезпечних курсів. Показано, що інерційність судна при повороті веде до зниження дистанції найкоротшого зближення до величини меншої гранично-допустимої відстані. Обґрунтована залежність для розрахунку уточненого значення гранично-допустимої відстані з урахуванням інерційності судна, і описана процедура ви-

бору маневру зміни курсу одного з суден при незмінних параметрах руху іншого судна.

Попередження зіткнень суден методами зовнішнього управління процесом розходження з використанням області небезпечних значень швидкостей суден розглянуто в роботах [81-86].

Роботи [87, 88] присвячені методу локально-незалежного управління процесом розходження суден з урахуванням форми відносної траєкторії розходження.

Одним із домінуючих напрямків наукових досліджень проблеми підвищення безпеки судноводіння є моделювання руху судна в стислих умовах плавання, чому присвячений ряд публікацій [89-110].

Аналізу динамічних моделей обертального руху судна для опису зміни його курсу при повороті присвячена робота [89], в якій розглянуто три моделі зміни курсу судна під час його повороту. Перша кінематична модель описує зміну курсу судна з незмінною кутовою швидкістю, а друга та третя моделі представлені диференціальними рівняннями другого та третього порядку по змінній курсу. Найбільш адекватною реальному процесу повороту судна є третя модель його обертального руху, що показано натурними спостереженнями поворотності.

Розробці інформаційної системи імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями присвячена робота [90], що враховують аналітичні залежності від кута кладки керма і оборотів двигуна. Розглянута система зможе забезпечити новий тип планування маневрів судна та поточний контроль реалізації заданого маневру. Системою передбачено відображення завдані маневри одночасно з фактичним рухом судна та з індикацією прогнозованої траєкторії, яка визначається реальними вхідними даними від датчиків судна.

В роботах [91-93] розглянута розробка методів високоточного управління судном в стислих районах плавання, причому застосована динамічна модель повороту судна третього порядку з урахуванням часу перекладки пера керма, яка приведена в роботі [91]. В статті [92] розглянуто формування траєкторії повороту судна, а робота [93] присвячена аналізу експериментального дослідження моделей поворотності судна.

В роботі [94] викладено методи прогнозу мореплавства та розглянуто основні принципи вибору судноводієм рішень для забезпечення безпеки при плаванні судна в штормових умовах. В ній приведені характеристики сучасних бортових автоматизованих систем призначених для поточної оцінки, прогнозу та оптимізації процесу судноводіння. Відмічено особливості відображення інформації, наведено технічні характеристики їх функціональних можливостей.

Існуючі засоби прогнозу руху суден, які успішно використовувались протягом тривалого часу, як зазначається в роботі [95], забезпечують спрощені прогнози та обмежують їх використання в частині термінового поточного відображення руху судна при зміні керуючих впливів, тобто положення пера керма та обертів двигуна. Тому потрібна розробка більш вдосконалених прогнозних моделей руху судна, які забезпечать його безаварійне плавання та необхідну точність реалізації криволінійної траєкторії руху.

В роботі [96] викладені результати оцінки адекватності прийнятої до розгляду математичної моделі руху шляхом дослідження впливу додаткових її нелінійних членів на режими руху судна. Виявлено залежність біфуркаційної картини від зміни вітру. Істотне підвищення ефективності автопілоту та подолання певного рівня некерованості судна було досягнуто шляхом введення інтелектуальної складової до його алгоритму управління.

Коефіцієнти впливу параметрів математичної моделі судна на його маневрені характеристики введені в роботі [97], причому визначені коефіцієнти впливу для радіусу сталої циркуляції судна, висуву, початкової поворотності судна та параметрів його одержування.

В статті [98] розглядаються власні властивості лінійних моделей маневрування суден і настройки моделі повної версії. Стаття містить нові результати про властивості лінійної динаміки судна, причому основна увага надається формулюванню незв'язаних рівнянь руху і рискання другого порядку, а також нестандартній поведінці їх похідної при виконанні зигзагоподібного маневру. Як додаток до настройки моделі повної версії виводиться цикл поведінки судна у області дрейфового рискання при зигзагоподібному маневрі, що регулюється константами часу, які залежні від швидкості. Якщо будуть використані добре відомі наближення першого порядку, то цей і ефект перевищення кута нахилу, швидше за все, будуть втрачені.

Дворівнева система управління рухом швидкісних суден, що складається зі стратегічного і виконавчого рівнів, пропонується в роботі [99]. Наводиться склад системи та визначається її структура на прикладі двох типів швидкісних суден. Розглянуті підходи до проектування підсистем керування системи.

Використання методу рекурсивного найменшого квадрату на основі векторних машин підтримки для ідентифікації параметрів моделей маневрування суден розглянуто в статті [100]. Ідентифікація системи в поєднанні з повномасштабним або вільним модельним тестом є переважною серед декількох основних підходів до оцінки моделей маневрування суден. Програми ідентифікації системи реального часу з використанням рекурсивного методу найменших квадратів застосовуються в цьому разі для он-лайн ідентифікації моделей маневрування суден. Проте цей метод залежить від об'єктів дослідження і початкових значень ідентифікованих параметрів. Для подолання цієї складності використовуються інтелектуальні технології, тобто опорні векторні маши-

ни, які проводять оцінку початкових значень ідентифікованих параметрів з кінцевими вибірками. Реальні виміряні дані про рух судна класу *Mariner* завжди включають шум від датчиків і зовнішніх збурень, тому дані моделювання симуляції зигзага містять значну кількість білого шуму. Для фільтрації даних, спотворених шумом використовуються метод *Wavelet* і декомпозиція емпіричного режиму. Порівняння результатів ідентифікації і істинних значень параметрів показує, що ідентифіковані моделі маневрування суден мають хорошу згоду з імітованими процесами руху судна, а результати ідентифікації покращуються зі збільшенням розмірів вибірки.

Стаття [101] присвячена дослідженню безпілотного морського об'єкту, яке стосується комбінованої моделі руху транспортного засобу, що враховує навантаження підйомної сили та гідродинамічного характеру. Також урахуються гравітаційні сили та переміщення, опір та сили тяги, підйомні сили та інші гідродинамічні сили. Однією із цілей проведеного дослідження являється задача забезпечення високоточного прогнозу положення транспортного засобу, для чого необхідна розробка інтегрованої моделі формування, аналізу та обробки сигналів, які потрібні для точного управління курсом транспортного засобу. Одержано висновок про необхідність наявності системи стабілізації в структурі транспортного засобу. Інформація про комплексний підхід проектування рульового управління, системи стабілізації та позицінування транспортного засобу коротко представлена в роботі.

В статті [102] розглянуто навчання контролера штучної нейронної мережі, який призначений для автоматичного причалювання суден за новою концепцією "віртуальне вікно", що забезпечує мінімальний за часом маневр швартування. Одержані дані використовуються для навчання двох нейронних мереж по кладці пера керма та реверсу енергетичної установки. По завершенню навчання нейронних мереж проводилася оцінка ефективності пропонованого контролера з допомогою моделювання за методом Монте-Карло. Для навче-

них мереж проводиться експеримент з моделлю судна. За допомогою контролера судно виводиться лише в фінішну позицію на деякій відстані від пірсу для забезпечення безпеки. В статті також розглядається доцільність автоматичної допомоги буксира для остаточного виведення судна до пірсу.

Інтелектуальну систему прогнозу руху судна розглянуто в роботі [103], що імітує процес навчання автономного блоку керування, створеного за допомогою штучної нейронної мережі. Після аналізу вхідних сигналів блок керування обчислює значення необхідних параметрів маневрування судна в стислих водах. Безперервний контроль навігаційних параметрів судна та прогноз їх значень являються основною задачею системи, крім цього також можливе використання результату прогнозу для попередження судноводія про виникаючу загрозу.

В роботі [104] пропонується синтез алгоритму управління стабілізаційним на траєкторії рухом судна за комплексним економічним критерієм і критерієм точності з урахуванням нелінійної моделі судна і збурення. Пропонується ідентифікація математичної моделі судна із застосуванням лінійно-квадратичного методу і використанням багато альтернативної фільтрації.

В роботі [105] розглянуті питання ідентифікації судових моделей маневрування, за допомогою яких проводиться дослідження маневреності судна, проектування його систем управління рухом, та забезпечується розвиток систем управління судовими тренажерами. Нелінійна модель маневрування судна, що базується на основі аналізу гідродинаміки судна, сформована в роботі. Теорія ідентифікації систем використовується для оцінки параметрів моделі, а для розрахунку самих параметрів пропонується алгоритм, заснований на розширеній теорії фільтра Калмана. Він забезпечує усунення похибок, внесених під час процесу вимірювання. Використання циркуляції та зигзагоподібного маневру, які виконуються за допомогою імітатора управління судном, потребувалось для Ідентифікації параметрів експерименту.

Докладні відомості про навігаційно-інформаційні системи (НІС) судна представлені у роботі [106], в якій зазначається, що їм належить значна роль у забезпеченні безпеки судноводіння. Наведені характеристики складових частин, функціональні можливості НІС та розглянуто принципи відображення ними інформації.

В роботі [107] досліджений багатокритерійний алгоритм для планування траєкторії судна, який використовує евристичний метод, так званий Оптимізацією колоній мурашок. Група агентів - штучних мурашок шукає в просторі рішень безпечну, оптимальну траєкторію для судна. Проблема розглядається як багатокритерійна задача оптимізації з критеріями: безпека шляху, довжина шляху, відповідність міжнародним правилам запобігання зіткненням на морі (COLREG) і плавність ходу.

В статті [108] розглянута розробка автопілоту з використанням принципів нечіткої логіки. В ній розглядаються питання адаптації автопілоту з урахуванням складної динаміки судна та нелінійності його математичної моделі при випадково змінюваних умовах роботи.

В роботі [109] викладено теорію управління динамічними об'єктами зі змінними параметрами з позицій синергетики, в якій розглянуті нейромережі та їх архітектура, традиційні системи управління та системи із застосуванням нечіткої логіки для управління. Також наведені приклади нейронного управління та приведені синтезовані нейромережеві системи управління.

Моделі керованого об'єкта, засновані на використанні нейронних мереж, присвячена робота [110], які використовуються у більшості сучасних систем управління складними динамічними об'єктами для формування керуючих впливів. В роботі морські судна відносяться до класу так званих невизначених об'єктів.

Роботи [111-133] виконанні автором особисто або в співавторстві і присвячені питанням зовнішнього управління процесом розходження суден з до-

помогою областей неприпустимих значень курсів суден, що зближаються, з урахуванням їх інерційних характеристик поворотності та навігаційних перешкод в районі маневрування.

1.2. Вибір напрямку дисертаційного дослідження.

Аналіз літератури по вирішенню проблеми забезпечення безпечного судноводіння показав, що основним аспектом зниження аварійності суден являється попередження їх зіткнень в стислих районах плавання за рахунок розробки нових методів вибору оптимальної стратегії розходження суден з урахуванням сучасних можливостей комп'ютерних інформаційно-управляючих технологій. Для суден, що знаходяться в стислих водах, при виникненні ситуації небезпечного зближення потрібно урахування як навігаційних перешкод, так и навколишніх суден. Причому виникають ситуації небезпечного зближення трьох і більше суден. В таких випадках вибір маневру безпечного розходження існуючими методами неможливий, тому виникає необхідність розробки нових сучасних процедур оперативного визначення наявності небезпечного зближення та розрахунку параметрів маневру розходження зміною курсів одного або обох суден з допомогою областей неприпустимих значень параметрів руху судна.

Сучасне комп'ютерне оснащення судових виробничих процесів та високий рівень використання на судні інформаційних технологій роблять актуальним та перспективним комп'ютерну реалізацію нових методів запобігання зіткнення суден. При управлінні рухом суден в районі дії СУРС в ситуації їх небезпечного зближення використовується повне зовнішнє управління процесом розходження з використанням областей небезпечних значень курсів сформованих в першому наближенні.

Тому в дисертаційному дослідженні запропоновано розробку способу урахування динаміки суден, що зближаються, та навігаційних перешкод в районі маневрування при формуванні областей небезпечних значень їх курсів та визначенні параметрів маневру розходження при його зовнішньому управлінні, чим і обумовлюється вибір напрямку досліджень даної дисертаційної роботи.

1.3. Висновки по першому розділу.

У першому розділі здійснено аналіз літературних джерел, на базі якого проведено аналіз основних напрямів вирішення проблеми зниження аварійності суден шляхом забезпечення безпеки судноводіння.

Було встановлено, що основними напрямками рішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння є розробка методів моделювання руху судна при плаванні в стислих районах, що сприяє їх більш ефективному і безпечному плаванню та попередження зіткнень суден у прибережних районах плавання.

Проведений аналіз дозволив одержати висновок про те, що центральним напрямом рішення вказаної проблеми є вдосконалення методів попередження зіткнень суден в ситуаціях їх небезпечних зближень при зовнішньому управлінні процесом розходження.

В розділі запроваджено обґрунтування основного напрямку дисертаційного дослідження, який присвячений розробці способу урахування динаміки суден, що зближаються, та навігаційних перешкод в районі маневрування при формуванні областей небезпечних значень їх курсів та визначенні параметрів маневру розходження при його зовнішньому управлінні.

Об'єктом дослідження є попередження зіткнення суден, а предметом дослідження є методи вибору оптимального маневру розходження при зовнішньому управлінні процесом розходження суден.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОРЕКТНОСТІ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.

2.1. Обґрунтування вибору теми дисертаційного дослідження.

В попередньому розділі показано, що однією із найбільш важливих проблем забезпечення безпеки судноводіння при плаванні в стислих водах являється попередження зіткнень суден, для чого впроваджене їх зовнішнє управління в ситуаціях небезпечного зближення з використанням областей небезпечних значень курсів сформованих в першому наближенні.

Тому в дисертаційному дослідженні запропоновано розробку способу урахування динаміки суден, що зближаються, та навігаційних перешкод в районі маневрування при формуванні областей небезпечних значень їх курсів та визначенні параметрів маневру розходження при його зовнішньому управлінні.

Для вирішення поставленої задачі, по-перше, потрібна розробка аналітичної процедури формування області небезпечних значень курсів суден, що зближуються, для чого слід одержати вирази, що формалізують межі області небезпечних курсів в залежності від динаміки судна. По-друге, на базі одержаної аналітичної процедури формування області небезпечних курсів слід забезпечити її відображення з допомогою комп'ютерної графіки і розробити спосіб вибору маневру безпечного розходження зміною курсів суден з урахуванням навігаційних перешкод в районі маневрування. Розроблені процедури необхідно реалізувати у вигляді комп'ютерної програми, що забезпечить оперативність, простоту і надійність запропонованого способу.

Таким чином, проблема попередження зіткнень суден розробкою сучасних способів вдосконалення процесу розходження, що мають комп'ютерну реалізацію, є актуальною і перспективною, що обумовлює вибір теми дисертації в наступній редакції: «Вдосконалення методів зовнішнього управління розходженням суден урахуванням їх динаміки та навігаційних перешкод».

Для вирішення задачі по вказаній проблематиці слід розглянути наступні основні етапи дослідження:

- методами системного підходу провести декомпозицію головної задачі дисертації на складові незалежних задач;
- одержати аналітичні вирази меж області небезпечних курсів з урахуванням динаміки суден та розробити процедуру її формування;
- розробити спосіб комп'ютерного графічного відображення області небезпечних курсів суден з метою вибору маневру безпечного розходження зміною їх курсів;
- розробити комп'ютерну імітаційну програму програвання вибраного маневру для перевірки коректності запропонованого в дисертації способу розходження суден.

Актуальність тематики дисертаційного дослідження визначають необхідність підвищення рівня безпеки судноводіння і вдосконалення методів розходження суден в обмежених районах плавання.

Розробка аналітичної процедури формування області небезпечних значень курсів суден і спосіб вибору параметрів маневру їх розходження зміною курсів в залежності від динаміки може скласти наукову новизну дослідження.

Економічну ефективність дисертаційного дослідження може скласти можливе скорочення збитків від зниження рівня аварійності внаслідок запобігання навігаційним аваріям.

Реалізація пропонованого наукового дослідження забезпечується можливістю розробки теоретичної частини роботи і її перевіркою за допомогою імітаційного моделювання.

Об'єктом дослідження дисертації є попередження зіткнень суден.

Предметом дослідження є методи вибору оптимального маневру розходження при зовнішньому управлінні суднами в ситуації небезпечного зближення.

2.2. Використання методів дослідження дисертаційної роботи.

На рис. 2.1 представлена технологічна карта методологічного забезпечення дисертаційного дослідження приведена, що є технологічним алгоритмом забезпечення коректності проведення дослідження та рішення його головної задачі методами системного підходу з використанням сучасних методологічних досягнень.

Сучасними запитами практики є необхідність підвищення рівня безпеки судноводіння і розробки сучасних методів управлінням процесу розходження суден.

Метою дисертаційного дослідження являється забезпечення безаварійності судноводіння шляхом вдосконалення методів попередження зіткнень суден розробкою способу вибору оптимального маневру їх розходження зміною курсів за допомогою області небезпечних значень курсів в залежності від динаміки суден.

Науковою гіпотезою дисертаційного дослідження є допущення про можливість підвищення оперативності і простоти вибору маневру розходження судна з небезпечною ціллю зовнішнім управлінням процесом розходження зміною курсів.

Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів і програми визначення параметрів маневру розходження суден маневром зміни їх курсів.

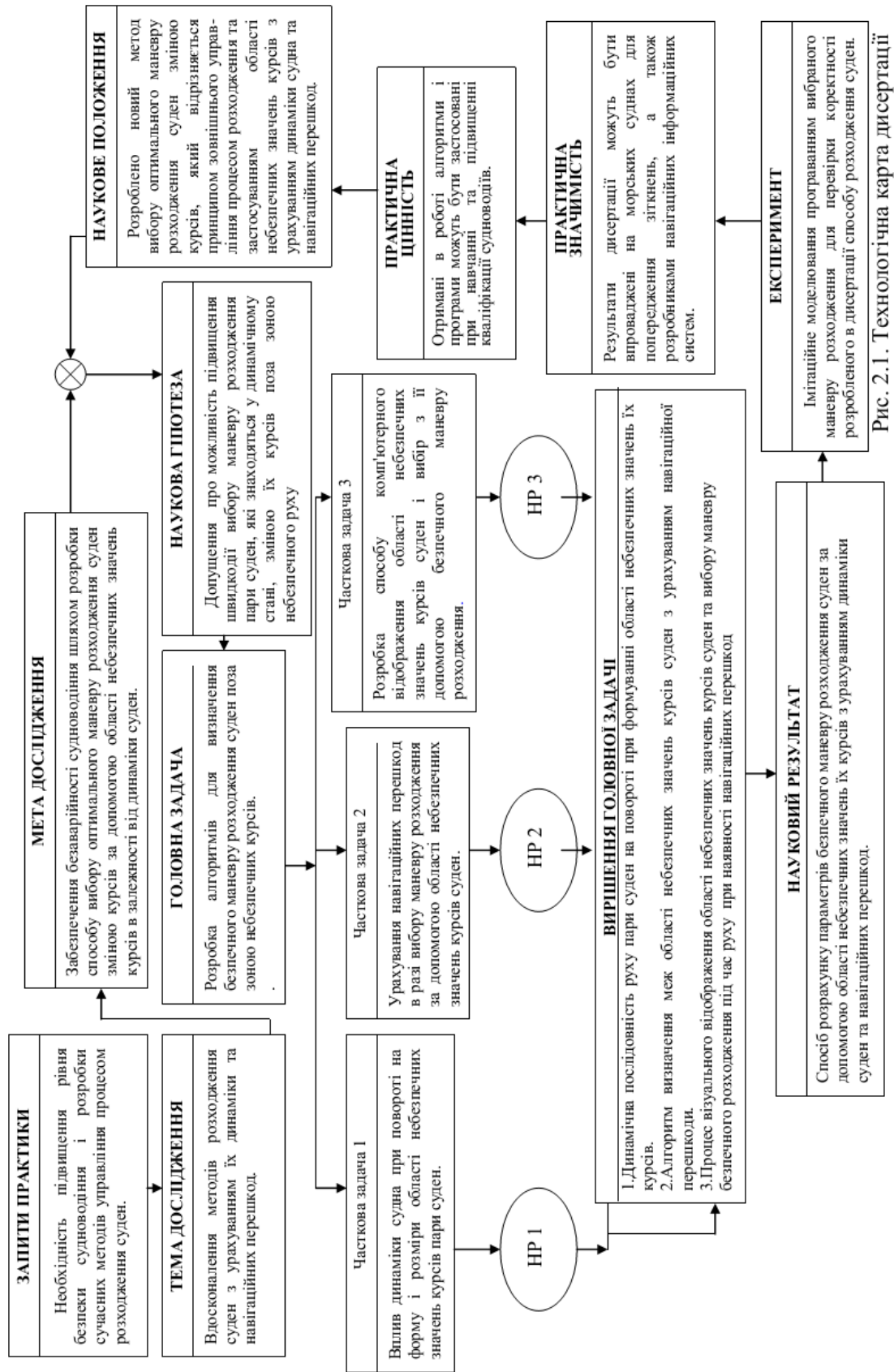


Рис. 2.1. Технологічна карта дисертації

Вирішення головної задачі дисертації потребувало методами теорії дослідження операцій її декомпозиції на незалежні складові задачі. Попереднім аналізом було виявлено доцільним розділити головну задачу дисертаційного дослідження на наступні три незалежні складові задачі:

1. Вплив динаміки судна при повороті на форму і розміри області небезпечних значень курсів пари суден.

2. Урахування навігаційних перешкод в разі вибору маневру розходження за допомогою області небезпечних значень курсів суден.

3. Розробка способу комп'ютерного відображення області небезпечних значень курсів суден і вибір з її допомогою безпечного маневру розходження.

Формалізація першої незалежної складової задачі вимагає, перш за все, аналізу динамічних моделей обертального руху судна, якими можливо здійснити аналітичний опис повороту судна. Надалі слід виявити вплив інерційності судна при повороті на дистанцію найкоротшого зближення в залежності від типу динамічної моделі, яка вибрана для прогнозу маневру. За результатами вирішення даного питання потрібно скоректувати вираз для розрахунку межі області небезпечних значень курсів суден і виявити зміни, яких зазнали форма та розміри області. За визначенням областю небезпечних курсів являється така в системі координат курсів суден, кожній крапці (значенню курсів суден) якої відповідає дистанція найкоротшого зближення із значенням меншим, чим гранично-допустима дистанція. Рівняння меж області неприпустимих курсів відповідає рівнянню, що має в правій частині вираз прогнозованої дистанції найкоротшого зближення, а в лівій частині містить значення гранично-допустимої дистанції. Дане рівняння слід перетворити таким чином, щоб одержати залежність курсу одного судна від курсу другого судна, що і є рівнянням межі області небезпечних значень курсів. Слід зазначити, що в кожній точці межі області дотримується рівність прогнозованої дистанції найкоротшого зближення з гранично-допустимою дистанцією.

Урахування навігаційних перешкод в разі вибору маневру розходження з допомогою області небезпечних значень курсів суден є другою незалежною складовою задачею дисертаційного дослідження. Вирішення цієї складової задачі передбачає здійснення аналізу формалізації різних типів навігаційних перешкод: точкової, лінійної розподільної та складної розподільної. Для кожного типу навігаційних перешкод слід розробити процедуру визначення граничних допустимих курсів обох суден, які обмежують множину неприпустимих значень курсів ухилення. Одержані множини слід відобразити разом з графічними зображенням області небезпечних значень курсів суден.

Розробка способу комп'ютерного графічного відображення області небезпечних курсів та визначення оптимального маневру розходження зміною курсів суден з її допомогою є третьою складовою задачею дослідження. Вирішення вказаної задачі потребує розробки комп'ютерної програми, яка складається з окремих модулів розрахунку меж області небезпечних значень курсів, її формування та відображення на екрані монітору для вибору оптимальних курсів маневру розходження суден із можливістю подальшого його програмування.

Згадана імітаційна програма може явитися основою для розробки навігаційної інформаційної системи вибору оптимального маневру розходження суден при зовнішньому управлінні їх процесу розходження.

Наступні модулі мають складати імітаційну програму:

- модуль генерування початкової ситуації небезпечного зближення пари суден;
- модуль визначення меж області небезпечних значень курсів суден та її графічне відображення;
- модуль реалізації процедури вибору оптимального маневру розходження суден зміною їх курсів з використанням сформованої області небезпечних значень курсів суден;

- модуль анімаційного програвання маневру з використанням комп'ютерної графіки.

При рішенні кожній з складових незалежних задач були одержані відповідні наукові результати, які позначені на технологічній карті, як НР1, НР2 і НР3:

- науковим результатом першої складової задачі НР1 є процедура урахування динаміки судна при повороті в разі формуванні області небезпечних значень курсів пари суден;

- спосіб розрахунку меж області небезпечних значень курсів суден з урахуванням навігаційних перешкод є науковим результатом НР2 другої складової задачі;

- процедура графічного відображення області небезпечних значень курсів суден та вибору маневру розходження з її допомогою з урахуванням динаміки судна та навігаційних перешкод є науковим результатом НР3 третьої складової задачі.

Також слід провести імітаційне моделювання за допомогою розробленої комп'ютерної програми для перевірки результатів дисертаційного дослідження в частині коректності методу вибору оптимального маневру розходження суден зміною їх початкових курсів при застосуванні області небезпечних значень курсів суден, що небезпечно зближуються.

Наукова гіпотеза про можливе підвищення оперативності і простоти вибору маневру розходження суден при їх зовнішньому управлінні з допомогою області небезпечних значень курсів суден, підтверджена одержаними в дисертаційній роботі теоретичними результатами та імітаційним моделюванням.

Практична значущість властива проведеному дисертаційному дослідженню, яка полягає у тому, що його результати можуть бути упроваджені на судна для попередження зіткнень, а також використані розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для зовнішнього управління суднами.

Одержані в роботі теоретичні результати і програми можуть бути застосовані при навчанні і підвищення кваліфікації судноводіїв, що визначає практичну цінність результатів дисертаційної роботи.

Наукове положення дисертаційного дослідження визначається одержаними науковими результатами і проведенням імітаційним моделюванням і має наступне формулювання:

Розроблено новий метод вибору оптимального маневру розходження суден зміною курсів, що реалізований в комп'ютерному модулі і який відрізняється принципом зовнішнього управління процесом розходження та застосуванням області небезпечних значень курсів з урахуванням динаміки судна та навігаційних перешкод.

2.3. Опис методики проведення дисертаційного дослідження.

Короткий виклад методики проведення дисертаційного дослідження з вказівкою вживаних для цього методів є змістом даного підрозділу.

Як рекомендується вимогами по організації і проведенню наукових досліджень методами дедукції слід провести аналіз основних напрямків вирішення проблеми безпеки судноводіння, чим обумовлюється вибір основного напрямку і теми дисертаційного дослідження.

Декомпозиція головної задачі дисертації на декілька незалежних складових задач з допомогою методів дослідження операцій, які також забезпечують методологічне обґрунтування дисертаційного дослідження, визначають другий етап роботи.

При цьому слід розглянути в першому наближенні урахування навігаційних небезпек і інерційності судна при виборі маневру розходження зміною курсу з допомогою області небезпечних курсів.

Дослідити питання урахування інерційності при повороті суден, що небезпечно зближуються, і наявності навігаційних небезпек в районі їх маневрування при формуванні області небезпечних курсів суден. Показати, що через інерційність суден при їх повороті дистанція найкоротшого зближення виявляється менше розрахункової і розробити процедури обчислення приросту гранично-допустимої дистанції для різних моделей обертального руху судна і створити комп'ютерну програму розрахунку меж області небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден і уточнити процедура вибору безпечних курсів ухилення суден для розходження.

Надалі розглянути процедуру урахування навігаційних небезпек при виборі маневру розходження суден за допомогою області небезпечних курсів. Знайти вирази для розрахунку граничних курсів ухилення суден за наявності різних типів навігаційних небезпек: точкових, розподілених лінійних і складних розподілених. Забезпечити відображення граничних курсів ухилення разом з областями небезпечних курсів і розробити процедура вибору безпечних курсів ухилення суден для розходження з урахуванням обмежень, що виникають унаслідок наявності навігаційних небезпек.

Завершальним етапом роботи є розробка модулю програмування маневру розходження застосованим способом для перевірки коректності процедури вибору маневру розходження в заданій ситуації небезпечного зближення.

2.4. Висновки по другому розділу.

В другому розділі дисертаційної роботи обґрунтовано вибір теми дослідження з його головними напрямками. В ньому також розроблена технологічна карта дослідження, яка являє собою методологічну структуру дисертації, методологічне забезпечення якої приведено в одному із підрозділів.

Технологічна карта включає мету дисертаційного дослідження та його головну задачу, що розділена на три незалежні складові задачі. Сформульована і підтверджена гіпотеза наукового дослідження, також показано, що в результаті рішення незалежних складових задач одержані відповідні наукові результати дисертаційної роботи. Приведені результати роботи, яким притаманна наукова новизна, і виділені положення дослідження, що одержані вперше.

Значущість і практична цінність дисертаційного дослідження, які обумовлюють можливість впровадження практичних рекомендацій, одержаних в дисертаційній роботі, приведені у другому розділі дисертації, а також сформульоване наукове положення роботи.

Окремим підрозділом коротко розглянута методика рішення складових задач, поставлених в дисертаційній роботі. Слід зазначити, що розглянута методика являється не стільки описом основних етапів виконання наукового дисертаційного, скільки є узагальненим алгоритмом виконання дисертаційного дослідження. При цьому отримані теоретичні розробки з використанням сучасних методів аналітичного аналізу та проведено імітаційне комп'ютерне моделювання для підтвердження коректності одержаних теоретичних результатів в частині розробки способів і процедур визначення параметрів безпечних маневрів розходження суден.

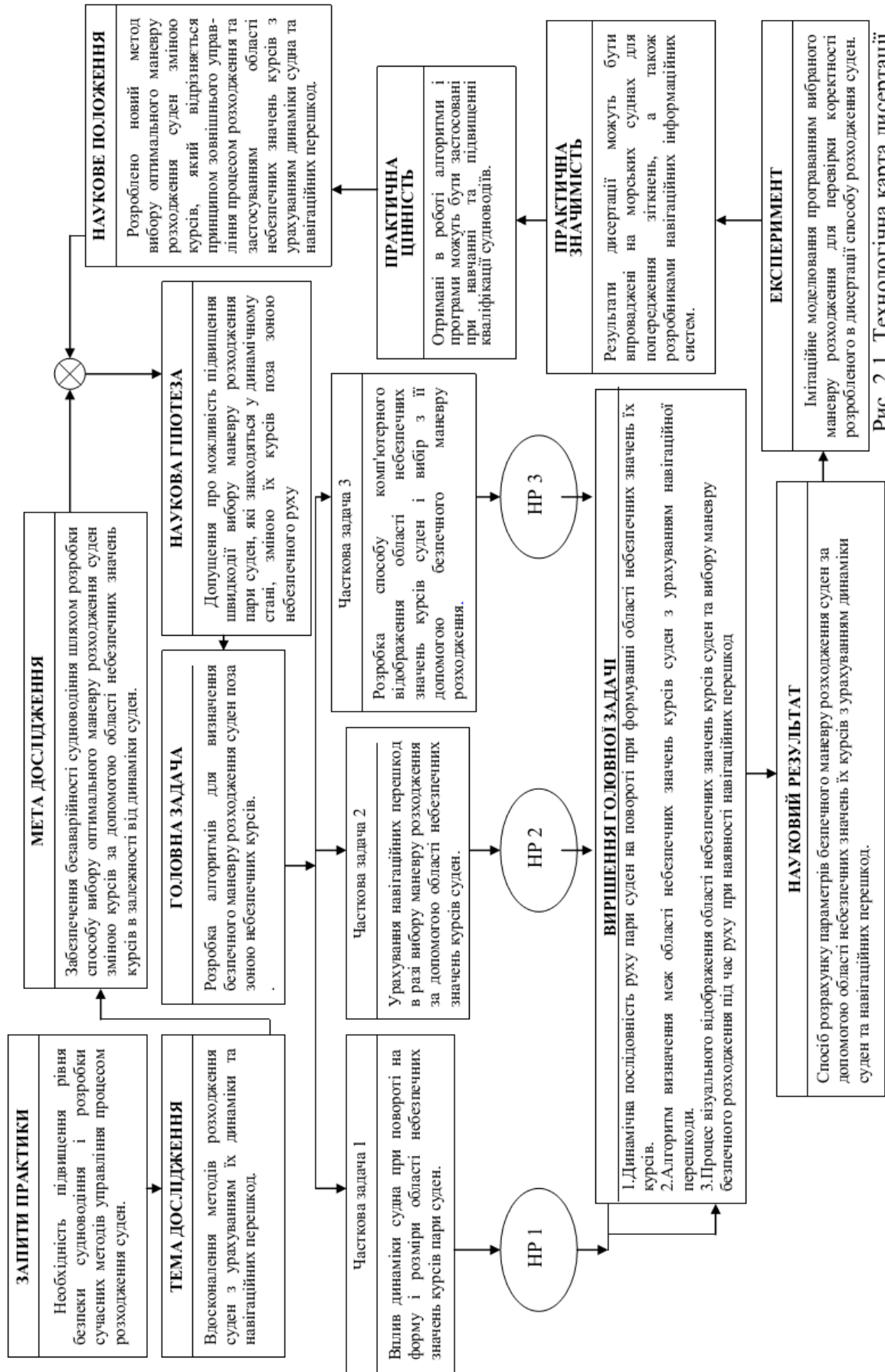


Рис. 2.1. Технологічна карта дисертації

РОЗДІЛ 3.

ВИБІР МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН МІНІМАЛЬНОЇ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Мінімальна динамічна система та її характеристики.

Для формалізації процесу розходження суден важливим аспектом є аналітичний опис закономірностей відносного руху пари суден і його характеристика з точки зору безпеки плавання.

У роботах [40, 131] показано зв'язок параметрів відносного і істинного руху суден мінімальної динамічної системи, причому проекції сумарної відносної швидкості V_{otx} (по меридіану) та V_{oty} (за паралеллю) мають такі вирази:

$$V_{otx} = V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2 \quad \text{и} \quad V_{oty} = V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2.$$

Тому модуль відносної швидкості V_{ot} визначається очевидним чином:

$$V_{ot} = \sqrt{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}, \quad \text{або}$$

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

Відносний курс K_{ot} з урахуванням знаків проекцій V_{otx} та V_{oty} визначається з наступного виразу:

$$K_{ot} = \begin{cases} \psi, \text{ при } V_{otx} > 0, V_{oty} > 0, \\ \pi + \psi, \text{ при } V_{oty} < 0, \\ 2\pi + \psi, \text{ при } V_{otx} < 0, V_{oty} > 0 \end{cases}, \quad (3.1)$$

де $\psi = \arcsin[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)/V_{ot}]$.

За допомогою дослідження похідної $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$ в зазначених роботах отримані закономірності зміни відносного курсу K_{ot} при зміні істинного курсу одного з суден. Через K_o та V_o позначені істинний курс і швидкість судна, що виконує поворот, а для судна, що зберігає незмінні курс, параметри руху позначені K_c та V_c .

Вираз першої похідної відносного курсу за істинним курсом судна, тобто

$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$ має такий вигляд:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{V_o[V_o - V_c \cos(K_o - K_c)]}{V_{ot}^2}. \quad (3.2)$$

Аналіз виразу $\frac{\partial K}{\partial K_o}{}^{ot}$ показує, що при нерівності $V_o > V_c$ для будь-якої

зміни курсу судном вираз $V_o - V_c \cos(K_o - K_c)$, як і величина $\frac{\partial K}{\partial K_o}{}^{ot}$, позитивні для всіх значень K_o .

В даному випадку ($V_o > V_c$) при зміні курсу K_o відносний курс K_{ot} може приймати будь-які значення від 0 до 2π , причому відносний курс приймає значення $K_c + \frac{\pi}{2}$ при значенні курсу K_o , рівного $K_c + \arccos \rho$, і значення відносного курсу $K_c + \frac{3\pi}{2}$ досягається за рівності $K_o = K_c - \arccos \rho$, де прийнято позначення $\rho = \frac{V_c}{V_o}$. Для початкових даних $V_c = 12$ вузлів, $V_o = 21$ вузлів і $K_c = 310^\circ$ на рис. 3.1 показано залежність відносного курсу K_{ot} від курсу судна K_o . На даному рисунку прийняті наступні позначення:

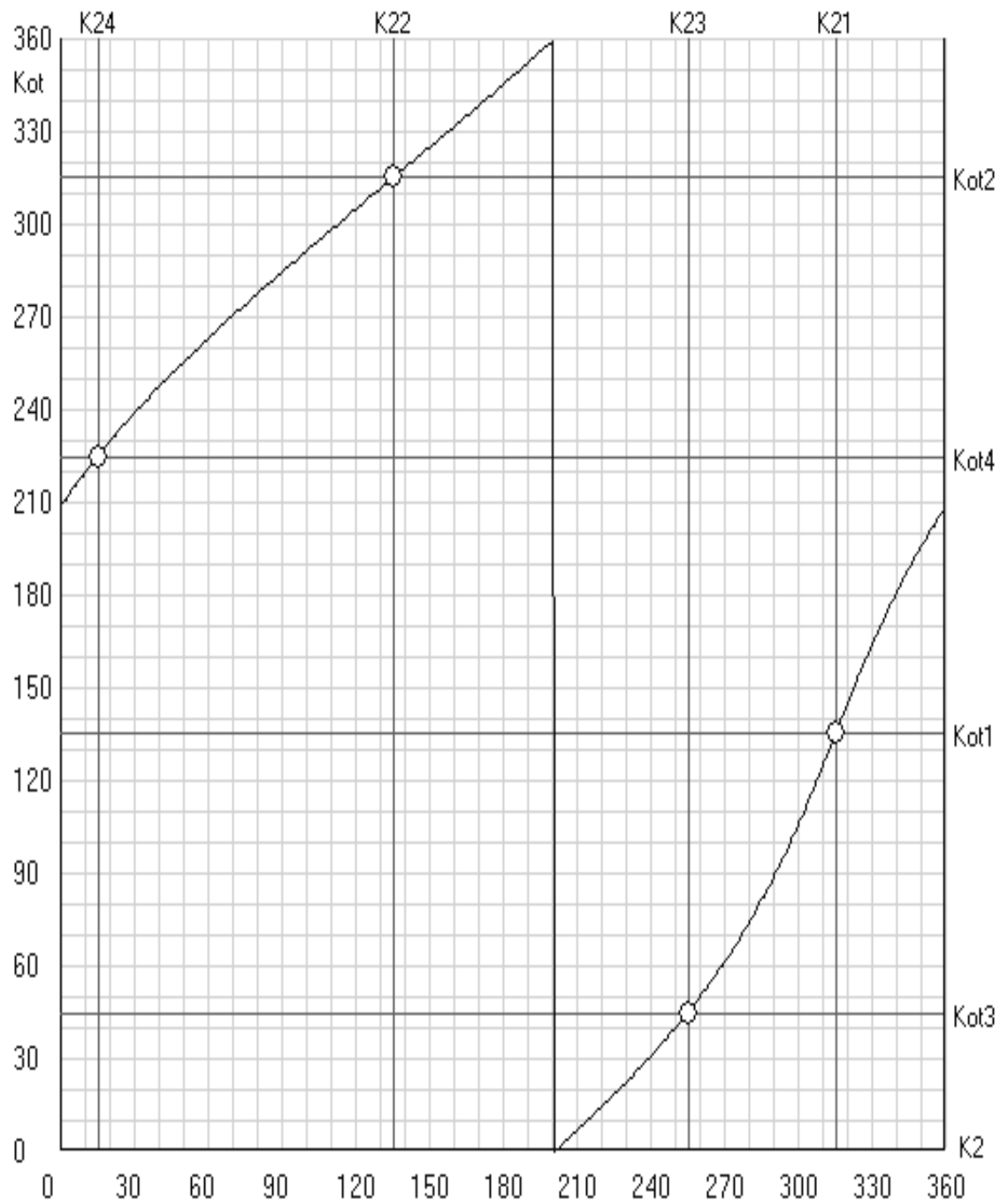


Рис. 3.1. Залежність відносного курсу K_{ot} від курсу судна K_o при $\rho > 1$

$$\begin{aligned}
 K_{21} &= K_c, \quad K_{22} = K_c + \pi, \\
 K_{23} &= K_c - \arccos \rho, \quad K_{24} = K_c + \arccos \rho, \\
 K_{ot1} &= K_c + \pi, \quad K_{ot2} = K_c, \\
 K_{ot3} &= K_c - \arccos \rho, \quad K_{ot4} = K_c + \arccos \rho.
 \end{aligned}$$

$$K_{ot3} = K_c + \frac{\pi}{2}, \quad K_{ot4} = K_c + \frac{3\pi}{2}.$$

Якщо швидкість судна менше швидкості цілі, тобто $V_o < V_c$ при незмінному курсі цілі K_c , то, як випливає з рівняння (3.2), вираз $V_o - V_c \cos(K_o - K_c)$ і перша похідна $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$ можуть мати як додатне, так і від'ємне значення, а область значень відносного курсу K_{ot} обмежується екстремальними значеннями, які позначені K_{otmin} і K_{otmax} .

При зростанні курсу K_o відносний курс K_{ot} може, як прирощуватися, так і зменшуватися.

При прирощенні курсу K_o від значення K_{omin} до значення K_{omax} через значення $K_c + 180$ відносний курс K_{ot} також зростає від величини K_{otmin} до значення K_{otmax} . Отже, $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} > 0$ при $K_o \in [K_{omin}, K_{omax}]$.

При подальшому прирощенні курсу K_o від K_{omax} до K_{omin} через значення K_c відносний курс K_{ot} зменшується, тобто $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} < 0$ при $K_o \in [K_{omax}, K_{omin}]$.

Екстремальним значенням відносних курсів K_{otmin} і K_{otmax} відповідають курси судна K_{omin} і K_{omax} , які знаходяться з умови звертання першої похідної $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$ в нуль. У роботах [40, 131] отримано вирази для K_{omin} , K_{omax} , K_{otmin} і K_{otmax} , що мають вигляд:

$$K_{omin} = K_c + \arccos \rho;$$

$$K_{otmax} = K_c - \arccos \rho;$$

$$K_{otmin} = \pi + K_c - \arcsin \rho;$$

$$K_{otmax} = \pi + K_c + \arcsin \rho. \quad (3.3)$$

На рис. 3.2 показано, що при зміні курсу K_o судна в діапазоні від 0 до 2π відносний курс K_{ot} відносний курс... $[K_{otmin}, K_{otmax}]$. Причому, як випливає з наведеного рисунка, ділянки зростання і падіння величини відносного курсу K_{ot} відповідають інтервалам зміни істинного курсу судна K_o , отриманим аналітичним чином.

У разі, коли швидкості суден рівні, тобто $V_o = V_c$, то залежність відносного курсу K_{ot} від курсу K_o маневруючого судна представлена на рис. 3.3.

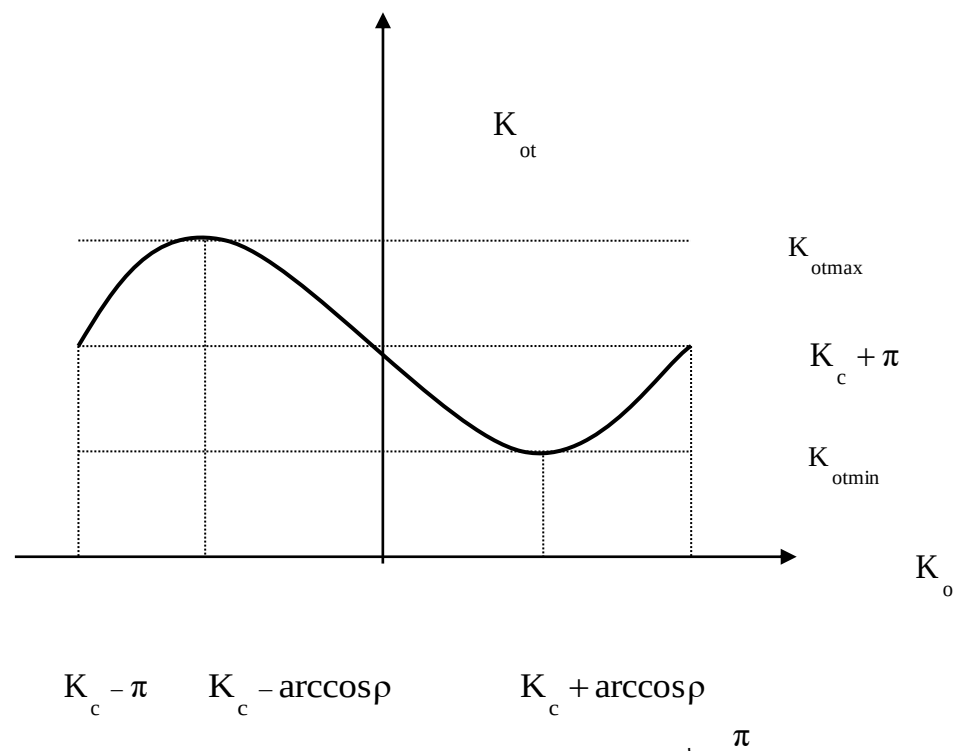


Рис. 3.2. Залежність відносного курсу K_{ot} від курсу K_o при $\rho < 1$

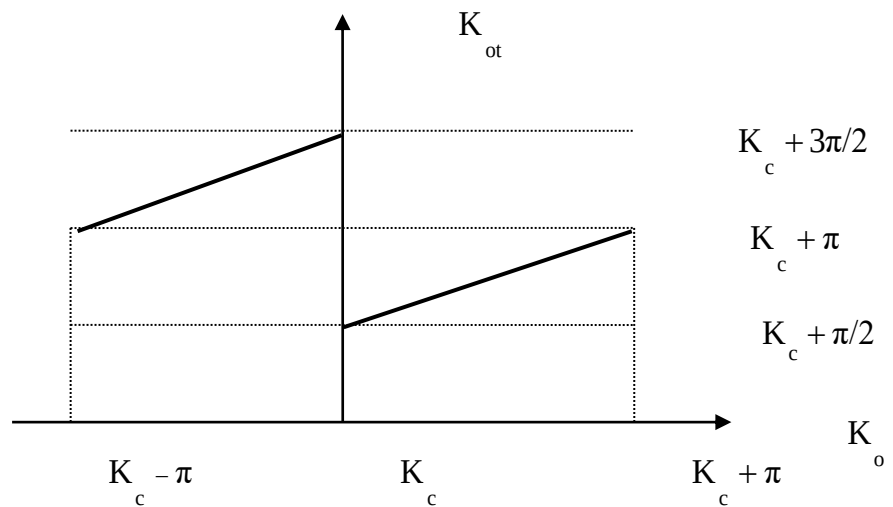


Рис. 3.3. Залежність відносного курсу K_{ot} від курсу судна K_o при $\rho = 1$

При зміні курсу судна K_o від 0 до 2π , як показано на рисунку, відносний курс приймає значення $K_{ot} \in [K_c + \pi/2, K_c + 3\pi/2]$, причому при $K_o = K_c$ відносний курс K_{ot} стрибкоподібно змінюється на 180° .

У роботах [40, 131] отримано аналітичний вираз залежності істинного курсу судна K_o від відносного курсу K_{ot} , яке має наступний вигляд:

$$K_o = K_{ot} + \arcsin [p^{-1} \sin(K_c - K_{ot})], \text{ при } \rho > 1;$$

$$K_o = K_{ot} + \arcsin [p^{-1} \sin(K_c - K_{ot})], \text{ при } \rho < 1 \text{ и } \Delta > 0;$$

$$K_o = K_{ot} + \pi - \arcsin [p^{-1} \sin(K_c - K_{ot})], \text{ при } \rho < 1 \text{ и } \Delta < 0;$$

$$K_o = 2K_{ot} + \pi - K_c, \text{ при } \rho = 1,$$

причому при попутних курсах відносно ухилення Δ від'ємне, тобто при прирощенні курсу судна відносний курс зменшується і навпаки, зустрічні курси характеризуються додатним значенням Δ .

Наведемо вираз для швидкості зміни відстані між суднами $\dot{D}$ (рис. 3.4), що необхідно для виявлення ситуації небезпечного зближення. Звертаємо

увагу, що першою ознакою можливого зіткнення суден є їх зближення. Тому безліч станів мінімальної динамічної системи можна розділити на підмножину суден, що зближаються, і підмножину суден, що віддаляються. Параметром даної ознаки є швидкість зміни відстані між суднами $\dot{D}$.

Враховуючи, що у відносному русі нерухомим є судно c_2 , то за допомогою рис. 3.4 отримаємо:

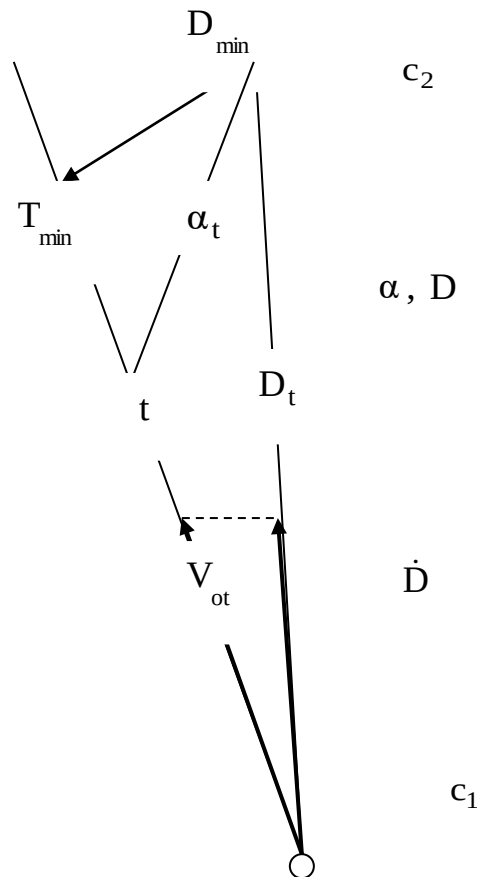


Рис. 3.4. До визначення величин $\dot{D}$ і D_{min}

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

Очевидно, що при зближенні суден $\dot{D} < 0$, що справедливо при $0 \leq \alpha - K_{ot} < \pi/2$. Оскільки рівність $\alpha - K_{ot} = \pi/2$ має місце в момент часу найкоротшого зближення $T_{\min}$, то до моменту часу $T_{\min}$ знак $\dot{D}$ є незмінним.

При незмінних швидкостях суден V_1 і V_2 розглянемо залежність швидкості $\dot{D}$ від курсів суден K_1 і K_2 . З останнього виразу отримаємо:

$$\dot{D} = -V_{ot}[\cos K_{ot} \cos \alpha + \sin K_{ot} \sin \alpha]. \quad (3.4)$$

Враховуючи вираз (3.1), можна записати:

$$\sin K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{\sqrt{(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)^2 + (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2)^2}} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_{ot}},$$

аналогічно

$$\cos K_{ot} = \frac{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2}{V_{ot}}.$$

З урахуванням цього вираз (3.4) приймає вигляд:

$$\dot{D} = -[(V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \cos \alpha + (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \sin \alpha].$$

Після групування:

$$\dot{D} = -[V_1 (\cos K_1 \cos \alpha + \sin K_1 \sin \alpha) - V_2 (\cos K_2 \cos \alpha + \sin K_2 \sin \alpha)],$$

або

$$\dot{D} = -[V_1 \cos(K_1 - \alpha) - V_2 \cos(K_2 - \alpha)].$$

Остаточно вираз для визначення зміни дистанції $\dot{D}$ має вигляд:

$$\dot{D} = V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha).$$

Зіткнення відбувається в тому випадку, коли дистанція між рухомими суднами порівнянна з габаритами суден. На судні проводиться поточний контроль і прогноз значення дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}$ (рис. 3.4) і зіставляється його з гранично-допустимою дистанцією $D_{\text{доп}}$, яка забезпечує безпечну розбіжність.

З рисунка випливає:

$$D_{\min} = \Delta_n D \sin(K_{\text{от}} - \alpha), \quad (3.5)$$

де Δ_n - співмножник, що забезпечує додатне значення $D_{\min}$.

Очевидно, момент часу досягнення значення $D_{\min}$, - час найкоротшого зближення $T_{\min}$, визначається виразом:

$$T_{\min} = \frac{D \cos(K_{\text{от}} - \alpha)}{V_{\text{от}}}.$$

Поточні значення дистанції D_{mint} і часу T_{mint} найкоротшого зближення в довільний момент часу $t < T_{\min}$ можна визначити при незмінних параметрах руху суден, коли $K_{\text{от}}$ і $V_{\text{от}}$ постійні.

Зі зміною часу змінюються поточні значення пеленга α_t і дистанції D_t . З рис. 3.4 випливає:

$$D_t = \sqrt{V_{\text{от}}^2 t^2 + D^2 - 2 D V_{\text{от}} t \cos(K_{\text{от}} - \alpha)}, \quad (3.6)$$

$$\alpha_t = K_{ot} + \arcsin \frac{D_{\min}}{D_t}, \text{ а также}$$

$$\alpha_t = K_{ot} + \arccos \frac{V_{ot}(T_{\min} - t)}{D_t}.$$

Тому $D_{\min} = D_t \sin(K_{ot} - \alpha_t)$ і, підставляючи перший вираз для α_t , отримуємо:

$$D_{\min} = D_t \sin(K_{ot} - K_{ot} - \arcsin \frac{D_{\min}}{D_t}) = D_{\min}.$$

В свою чергу, $T_{\min} = \frac{D_t \cos(K_{ot} - \alpha_t)}{V_{ot}}$ або, підставляючи другий вираз для

α_t , отримуємо:

$$T_{\min} = \frac{D_t \cos[K_{ot} - K_{ot} - \arccos \frac{V_{ot}(T_{\min} - t)}{D_t}]}{V_{ot}} = T_{\min} - t.$$

Таким чином, при $t < T_{\min}$ і незмінних параметрах руху обох суден дистанція найкоротшого зближення залишається постійною, а час найкоротшого зближення зменшується, перетворюючись в 0, якщо $t = T_{\min}$.

Поділ на підмножини суден, що зближаються, і підмножини, що віддаляються проводиться по межі пар курсів (K_1, K_2) , при яких $\dot{D} = 0$, чому відповідає рівняння:

$$V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha) = 0,$$

або

$$V_2 \cos(K_2 - \alpha) = V_1 \cos(K_1 - \alpha).$$

З останнього співвідношення випливає:

$$\cos(K_2 - \alpha) = \frac{V_1}{V_2} \cos(K_1 - \alpha),$$

звідки

$$K_{21} = \alpha + \arccos\left[\frac{V_1}{V_2} \cos(K_1 - \alpha)\right], \quad (3.7)$$

$$K_{22} = \alpha - \arccos\left[\frac{V_1}{V_2} \cos(K_1 - \alpha)\right]. \quad (3.8)$$

Вирази (3.7) і (3.8) представляють межі між областями зближення і віддалення суден. Вони показані на рис. 3.5, причому область всередині меж відповідає ситуації зближення суден.

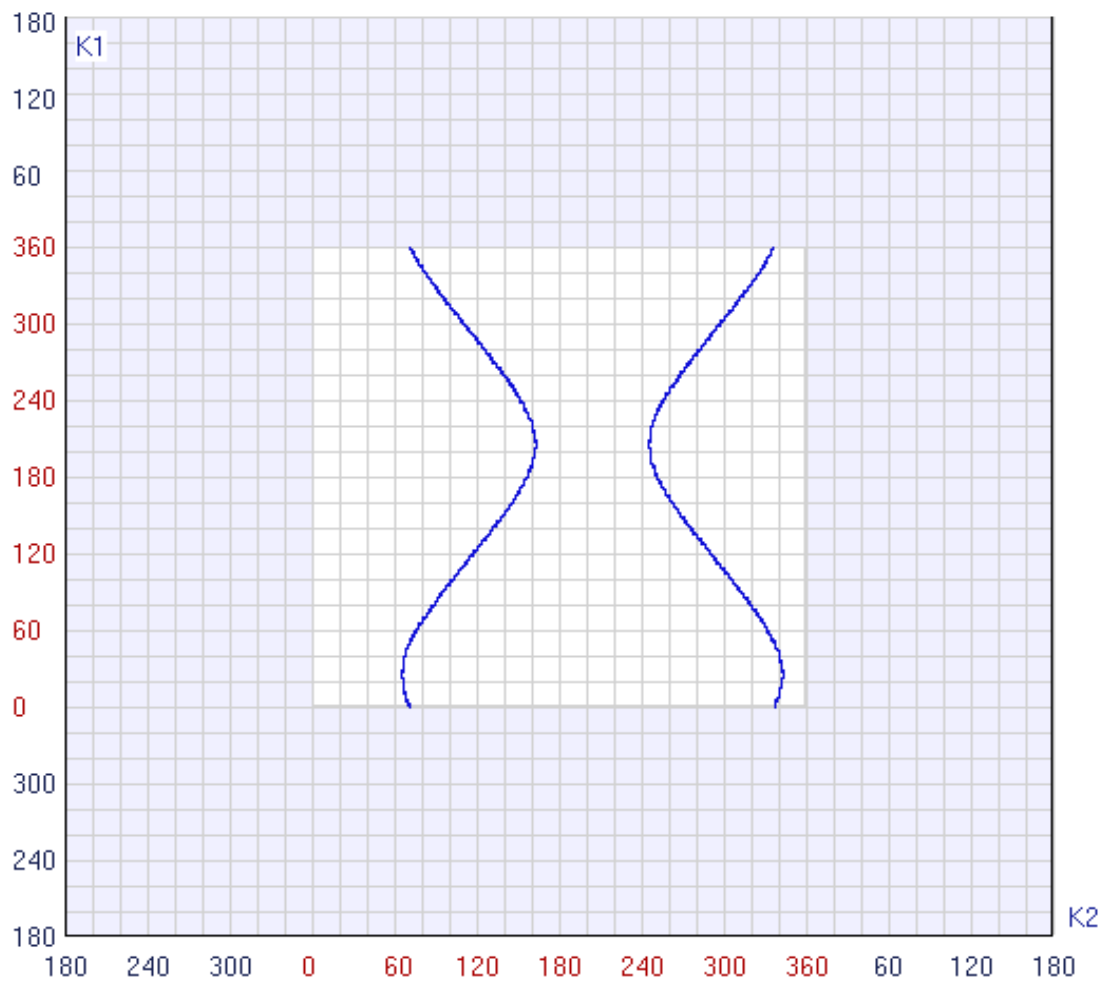


Рис. 3.5. Межі області зближення суден при $V_2 > V_1$

При зближенні суден ($\dot{D} < 0$) слід з'ясувати, чи існує небезпека зіткнення, тобто ситуаційне обурення. Для цього необхідно порівняти прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}$ з гранично-допустимою дистанцією D_d , значення якої визначається формою і розмірами суднової безпечної області.

У даній роботі будемо вважати, що безпечна область є кругом з радіусом D_d . Слідуючи роботі [1], розглянемо поняття ситуаційного збурювання, яке є характеристикою небезпеки зближення пари суден.

С кожним із суден, як показано в роботі [25], зв'язується двовимірна область неприпустимих позицій, звана судною безпечною областю, в якій небажано перебування будь-яких сторонніх об'єктів. При розгляді відносного переміщення суден таким об'єктом є інше судно. Область неприпустимих позицій формується таким чином, щоб її межа відповідала нульовій ймовірності зіткнення. А кожній точці всередині цієї області відповідає деяка відмінна від нуля ймовірність виникнення зіткнення, причому зростання ймовірності зіткнення суден відбувається зі скороченням найкоротшої дистанції між суднами.

Ситуаційне збурювання виникає при прогнозованому попаданні суден в область неприпустимих позицій. Воно виявляє прийдешню небезпечну позицію завчасно, виходячи з прогнозу зміни відносної позиції пари суден мінімальної динамічної системи. Тому воно носить умовний характер, оскільки на його істинність впливають можливі дії суден і спосіб прогнозу. Отже, ситуаційне збурювання ω виникає тоді, коли прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення $D_{\min}$ менше значення гранично-допустимої дистанції зближення D_d , величина якої залежить від форми області неприпустимих позицій і ракурсу зближення суден.

Характеристикою ситуаційного збурювання також є час запасу t_{zi} і t_{zj} для кожного з пари суден мінімальної динамічної системи, сенс якого полягає в наступному. Якщо при наявності ситуаційного збурювання дистанція між суднами перевершує значення D_d і судно може своїм маневром забезпечити максимальне значення дистанції найкоротшого зближення $\max D_{\min}$, для якого $\max D_{\min} > D_d$, то судно знаходиться в допустимій позиції. З плином часу дистанція між суднами скорочується і настає момент часу t_{di} , коли досягається рівність $\max D_{\min} = D_d$. При подальшому зближенні суден з програмними параметрами руху $\max D_{\min} < D_d$, судно потрапляє в підмножину неприпустимих позицій, причому ніяким маневром зміни курсу воно не зможе розійтися з іншим судном в дистанції D_d . Тому час запасу t_{zi} дорівнює інтервалу часу від поточного моменту до моменту часу t_{di} попадання судна в підмножину неприпустимих позицій. Значення загального часу запасу t_{zij} для пари суден доцільно вибрати зі співвідношення $t_{zij} = \min(t_{zi}, t_{zj})$.

Таким чином, ситуаційне збурювання ω може приймати три значення:

$$\omega = \begin{cases} 0, & D_{\min} > D_d, \\ 1, & D_{\min} \leq D_d, t_{zij} > 0, \\ 2, & D_{\min} \leq D_d, t_{zij} \leq 0. \end{cases} \quad (3.9)$$

Для декомпозиції множини станів небезпечного зближення системи S_{12} на підмножини ситуаційних збурень зі значеннями 1 і 2 враховуємо співвідношення значень $\max D_{\min}$ і D_{dop} . Зміна значень ситуаційного збурювання відбувається на межі, коли досягається рівність $\max D_{\min} = D_{dop}$.

Враховуємо, що:

$$\max D_{\min} = \Delta_n D \sin(K_{\text{extr}} - \alpha),$$

де α - пеленг на ціль.

Оскільки K_{extr} - екстремальний відносний курс рівний K_{otmin} або K_{otmax} , на якому дистанція найкоротшого зближення D_{min} максимальна, то, очевидно, справедливі наступні дві рівності:

$$\max D_{\text{min}}^{(\text{mx})} = \Delta_n D \sin(K_{\text{otmax}} - \alpha) \quad \text{та} \quad \max D_{\text{min}}^{(\text{mn})} = \Delta_n D \sin(K_{\text{otmin}} - \alpha).$$

При цьому:

$$K_{\text{otmin}} = \pi + K_2 - \arcsin \rho \quad \text{та} \quad K_{\text{otmax}} = \pi + K_2 + \arcsin \rho,$$

де $\rho = V_1 / V_2$ и $V_2 > V_1$.

Формалізація поведінки суден в ситуації небезпечного зближення вимагає використання коректного математичного апарату, який адекватно описує досліджуваний процес небезпечного зближення і розходження суден. Проведений аналіз показує, що сукупність суден в ситуації небезпечного зближення являє собою динамічну систему, тому більш детально розглянемо її опис і можливості для формалізації процесу розходження суден.

У роботах [132, 133] надано визначення динамічної системи, як будь-якого об'єкта або процесу, для якого однозначно визначено поняття стану, як сукупності деяких величин в даний момент часу і заданий закон, який описує зміну початкового стану з плином часу. За допомогою цього закону за початковим станом динамічної системи можна прогнозувати її майбутній стан. Математична модель динамічної системи вважається заданою, якщо введені параметри (координати) системи, що визначають однозначно її стан, і зазначений закон зміни стану. Залежно від ступеня наближення одній і тій же системі можуть бути поставлені у відповідність різні математичні моделі.

В роботі [131] обґрунтовано опис процесу розходження суден в термінах динамічної n-керованої системи. Локальна близькість суден, які належать до певної області S_c , дозволяє розглядати їх сукупність, як деяку динамічну си-

стему Σ , яка утворилася за принципом локальної близькості суден і їх приналежності до області S_c . Враховуючи, що центральним питанням, що диктує розробку математичної моделі, є забезпечення безпечного руху суден в аналізованій області, динамічна система Σ повинна описуватися з позицій їх безпечного відносного переміщення.

Скористаємося результатами роботи [133], і задамо динамічну систему, що описує сукупність n суден, враховуючи, що така система є керованою усіма n суднами. Даний опис має відношення тільки до динамічної системи без урахування впливу збурень зовнішнього середовища, яке формалізується у вигляді додаткових параметрів в математичній моделі.

Перш за все, задається відрізок часу $[t_0, T]$, причому t_0 в окремому випадку може приймати нульове значення. Фазовими координатами системи, які описують її стан, є координати $\xi_i(t)$ і $\eta_i(t)$ кожного із суден і їх параметри руху $V_i(t)$ і $K_i(t)$ в двовимірній прямокутній системі координат, пов'язаної з областю контролю S_c і орієнтованої в напрямку N-S.

Окремий стан $x = x(t)$, як елемент множини станів, є $4n$ -вимірним вектором, а множина станів - $4n$ -вимірною областю, причому $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, где X_i – множина станів i -го судна. Множина станів $X_i = (\xi_i, \eta_i, V_i, K_i)$ обмежується граничними значеннями фазових координат:

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

Динамічна система Σ характеризується ще двома додатковими атрибутами. По-перше, це безліч миттєвих значень вхідних керуючих впливів W , до яких в даному випадку відносяться кут кладки пера керма і обороти двигуна кожного i -го судна. По-друге, безліч стратегій поведінки Ω , характеризують правила вибору значень вхідних керуючих впливів у часі в залеж-

ності від поточних обставин. У розглянутій динамічній системі вхідний вплив «розділено» між учасниками спільного управління ($i=1,...,n$). Причому кожному учаснику поставлені у відповідність дві непустих множини U_i і D_i , які називаються відповідно множиною миттєвих значень управлінь i -го учасника та множиною стратегій того самого 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. В даному випадку зміна динамічної системи Σ описується диференціальними рівняннями.

Як вказується в роботі [133], 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 управліннями і безперервним часом. Її будемо позначати:

$$\Sigma = ([t_0, T], X, D_1, D_2, \dots, D_n, \chi). \quad (3.10)$$

Для динамічної системи Σ , описує сукупність n суден, додатково до опису (3.10) необхідно врахувати ще два істотних фактора:

- доцільний характер поведінки кожного з суден, що полягає, з точки зору судноводіння, в реалізації програмної траєкторії руху;
- наявність залежності стратегій D_i суден одне від одного і від поточної позиції. Якщо залежність існує, то необхідно отримати її формальне вираження.

Тому динамічну систему, утворену n суднами, яку позначимо Σ_{ns} , можна записати в наступному вигляді:

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

В даному виразі $G(D_i, X)$ - залежність стратегій одна від одної і від точної позиції, а $M(Tr_i)$ - сукупність програмних траєкторій руху суден. В 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 $G(D_i, X)$ і $M(Tr_i)$.

При переміщенні суден програмними траєкторіями в спільному районі плавання, визначальною обставиною є забезпечення їх безпечного руху одне до одного, що вимагає контролю величини відстані між судами. Тому виникає необхідність розгляду всіх пар суден динамічної системи Σ_{ns} з описом їх бінарних показників, що відображають відносне положення. У зв'язку з цим під позицією динамічної системи Σ_{ns} розуміється відносне положення суден, для чого введена в розгляд позиційна матриця P_n .

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

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

причому:

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

де β_i и V_{3i} - відповідно кут кладки пера керма і задана швидкість i -го судна системи.

Оскільки інтерес представляє взаємне положення суден і його зміна в часі, то елементарним об'єктом розгляду є пара суден, стан якої описується різницею координатами:

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

Мінімальна динамічна система Σ_{2s} складається з пари суден, а її характеристиками є відстань між суднами l_{ij} , пеленг α_{ij} з

i -го на j -е судно, відносні курс K_{otij} і швидкість V_{otij} .

При взаємодії суден мінімальної динамічної системи Σ_{2s} з компенсації ситуаційного збурювання система Σ_{2s} аналітично записується в наступному вигляді:

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

а її диференціальне рівняння зміни позиції:

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} V_1 \sin K_1(D_1) - V_2 \sin K_2(D_2) \\ V_1 \cos K_1(D_1) - V_2 \cos K_2(D_2) \end{pmatrix}.$$

У цьому рівнянні складові швидкості першого судна $V_1 \sin K_1$ і $V_1 \cos K_1$ залежать від стратегії розбіжності D_1 , а складові швидкості другого судна $V_2 \sin K_2$ і $V_2 \cos K_2$ визначаються стратегією розбіжності D_2 .

Компенсація ситуаційного збурювання проводиться стратегіями D_1 і D_2 обох суден за схемою, показаною на рис. 3.6. Можливості щодо ефективної компенсації ситуаційного збурювання в цьому випадку значно зростають, проте необхідне узгодження стратегій D_1 і D_2 розподіленим координатором c_0 .

Взаємодія суден мінімальної динамічної системи Σ_{2s} можливо тільки в рамках принципу їх взаємодії $G(D_1, D_2, X)$, покладеного в основу функціонування координатора c_0 . Ще раз звертаємо увагу на те, що при даному типі управління координатор виконує тільки узгодження стратегій, а параметри маневру розбіжності, в рамках норм координатора, розраховуються самими суднами.

На відміну від даного типу управління зовнішнє управління передбачає вибір типу стратегії розбіжності і розрахунку параметрів безпечного маневру, а судна тільки реалізують покладені на них стратегії.

Координатор c_0 впливає на динамічну систему Σ_{2s} як на єдиний об'єкт, який повинен мати достатню інформацію і організованість для компенсації ситуаційного збурювання, тому взаємодії суден за допомогою координатора c_0 повинні бути ідентично сприйняті обома суднами. При цьому для обох суден координатор повинен забезпечити однакову ідентифікацію виникаючої поточної позиції щодо її належності до підмножини небезпечних або безпечних позицій. Отже, координатор повинен наказувати обом суднам загальну процедуру виявлення реалізованого типу взаємодії, яка виробляє декомпозицію простору позицій з точки зору кожного з суден і такою інформацією володіє кожне з суден.

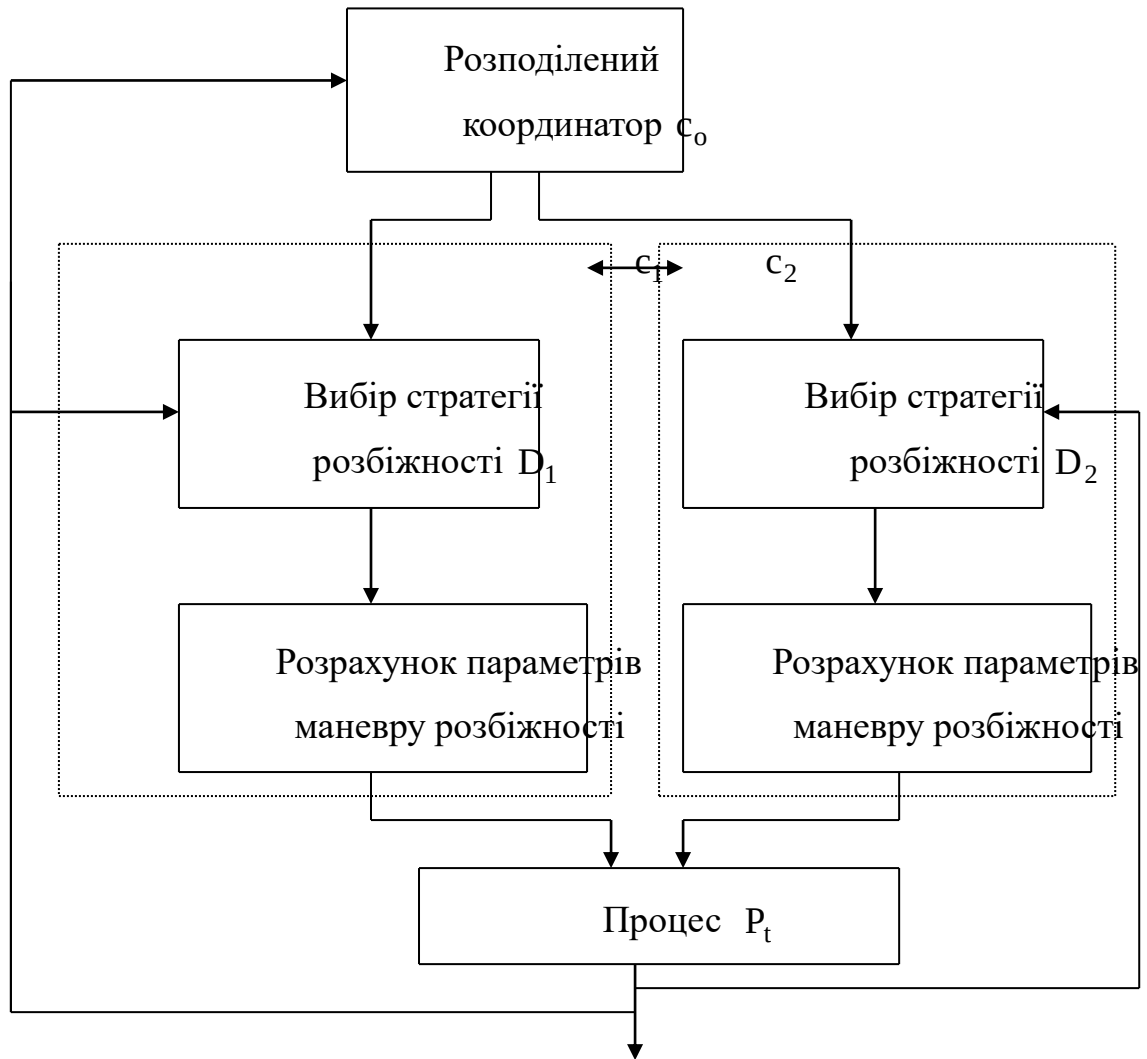


Рис. 3.6. Схема компенсації ситуаційного збурювання двома суднами

3.2. Область небезпечних курсів мінімальної динамічної системи

При зовнішньому управлінні суднами для попередження їх зіткнення, як вказується в роботі [73], для вибору маневру розбіжності зміною курсів доцільно застосування областей небезпечних курсів. Розглянемо це питання, спираючись на результати згаданої роботи.

Розглянемо ситуацію, коли в районі контролю станції управління рухом суден знаходяться два судна, які небезпечно зближуються. У початковий момент часу їх взаємне положення характеризується пеленгом α_{ij} і дистанцією D_{ij} , а взаємне переміщення - відносним курсом K_{otij} і швидкістю V_{otij} . Дистанція найкоротшого зближення D_{min} суден менше гранично допустимої дистанції d_d , тобто $D_{min} < d_d$, і судна зближуються небезпечно.

Станції управління рухом суден, що здійснює управління суднами, необхідно визначити курси суден K_i і K_j , при яких їх дистанція найкоротшого зближення буде більше гранично-допустимої дистанції d_d .

Аналітично це виражається наступним чином. З урахуванням виразу (3.11) можна записати:

$$D_{min} = \Delta_{ij} D_{ij} \sin(\alpha_{ij} - K_{ot}) \geq d_d, \quad (3.11)$$

де $\Delta_{ij} = -1$, при $\sin(\alpha_{ij} - K_{otij}) < 0$, в іншому випадку $\Delta_{ij} = 1$.

Дистанцію найкоротшого зближення D_{min} можна збільшити зміною відносного курсу K_{otij} , тобто курсів суден K_i і K_j . Знайдемо значення курсів суден, що забезпечують виконання умови (3.11).

Нерівність (3.11) можна представити в наступному вигляді:

$$\text{tg} K_{otij} \leq \text{tg} [\alpha_{ij} - \arcsin(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}})]. \quad (3.12)$$

Позначаючи $\gamma_{ij} = \alpha_{ij} - \arcsin(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}})$ і враховуючи, що відповідно до [1]:

$$\text{tg} K_{otij} = \frac{V_i \sin K_i - V_j \sin K_j}{V_i \cos K_i - V_j \cos K_j},$$

вираз (3.12) приймає наступний вигляд:

$$(\sin K_i \cos \gamma_{ij} - \cos K_i \sin \gamma_{ij}) \leq \rho_{ij} (\sin K_j \cos \gamma_{ij} - \cos K_j \sin \gamma_{ij}), \quad (3.13)$$

де $\rho_{ij} = V_j/V_i$.

Розглянемо спочатку відповідну рівність:

$$(\sin K_i \cos \gamma_{ij} - \cos K_i \sin \gamma_{ij}) = \rho_{ij} (\sin K_j \cos \gamma_{ij} - \cos K_j \sin \gamma_{ij})$$

або

$$\sin(K_i - \gamma_{ij}) = \rho_{ij} [\sin(K_j - \gamma_{ij})],$$

яка представляє аналітичний вираз межі небезпечної області S_{Dij} , що огорожує неприпустимі поєднання значень пар відповідних курсів K_i і K_j , причому одержане рівняння має два корені, тобто справедливі наступні аналітичні залежності:

$$K_i - \gamma_{ij} = \arcsin\{\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})]\},$$

$$K_i - \gamma_{ij} = \pi - \arcsin\{\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})]\}.$$

Як показало проведене дослідження, перший з двох коренів рівняння відповідає ситуації зближення суден, а другий - ситуації їх віддалення. Оскільки небезпека зіткнення виникає при зближенні суден, то рівняння меж небезпечних областей при зближенні суден визначається рівнянням:

$$K_i = \gamma_{ij} + \arcsin\{\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})]\}. \quad (3.14)$$

Отриманий вираз (3.14) характеризує межу між небезпечною і допустимою областями курсів K_i і K_j .

Якщо $V_i > V_j$, тобто $\rho_{ij} > 1$, то у виразі (3.14) має дотримуватися умова $\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})] \leq 1$, або $\sin(K_j - \gamma_{ij}) \leq \rho_{ij}^{-1}$. Отже, граничні значення курсу K_j рівні:

$$K_{j1} = \gamma_{ij} + \arcsin(\rho_{ij}^{-1});$$

$$K_{j2} = \gamma_{ij} + \pi - \arcsin(\rho_{ij}^{-1});$$

$$K_{j3} = \gamma_{ij} + \pi + \arcsin(\rho_{ij}^{-1});$$

$$K_{j4} = \gamma_{ij} + 2\pi - \arcsin(\rho_{ij}^{-1}),$$

а область значень змінної K_j визначається виразом:

$$K_j \in \{S_1 \cup S_2\}.$$

В останньому виразі області S_1 і S_2 можливих значень курсу K_j аналітично визначаються наступним чином:

$$S_1 = [\gamma_{ij} + 2\pi - \arcsin(\rho_{ij}^{-1}), \gamma_{ij} + \arcsin(\rho_{ij}^{-1})],$$

$$S_2 = [\gamma_{ij} + \pi - \arcsin(\rho_{ij}^{-1}), \gamma_{ij} + \pi + \arcsin(\rho_{ij}^{-1})].$$

Області S_1 і S_2 можливих значень курсу K_j , що задовольняють визначальній нерівності $\sin(K_j - \gamma_{ij}) \leq \rho_{ij}^{-1}$, представлено на рис. 3.7.

Для графічного відображення межі між небезпечною і допустимою областями курсів K_i і K_j було розроблено імітаційну комп'ютерну програму.

За допомогою зазначеної програми була отримана область S_{Dij} небезпечних курсів K_i і K_j для ситуації з параметрами $\alpha=75^\circ$, $D=3$ милі, $d_d=1$ миля, $V_i=15$ вуз, $V_j=20$ вуз, яку представлено на рис. 3.8.

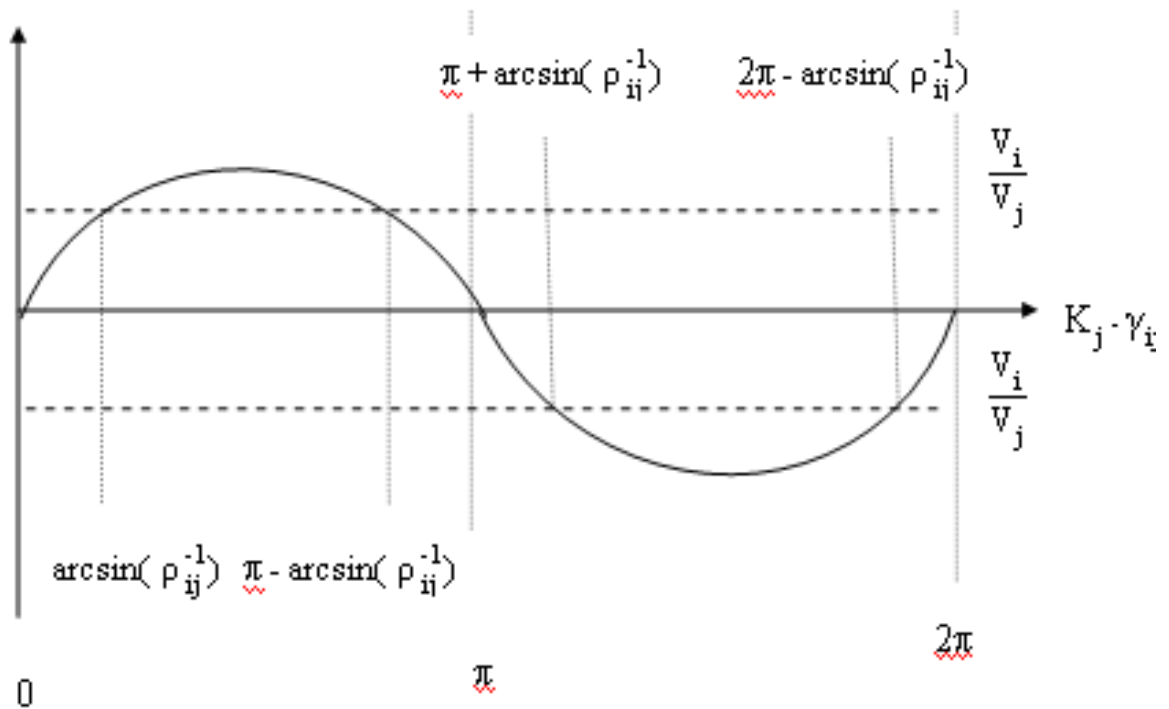


Рис. 3.7. Визначення областей S_1 і S_2

В разі $V_i = V_j$ впливає:

$$K_i - \gamma_{ij} = \arcsin\{\sin(K_j - \gamma_{ij})\},$$

$$K_i - \gamma_{ij} = \pi - \arcsin\{\sin(K_j - \gamma_{ij})\},$$

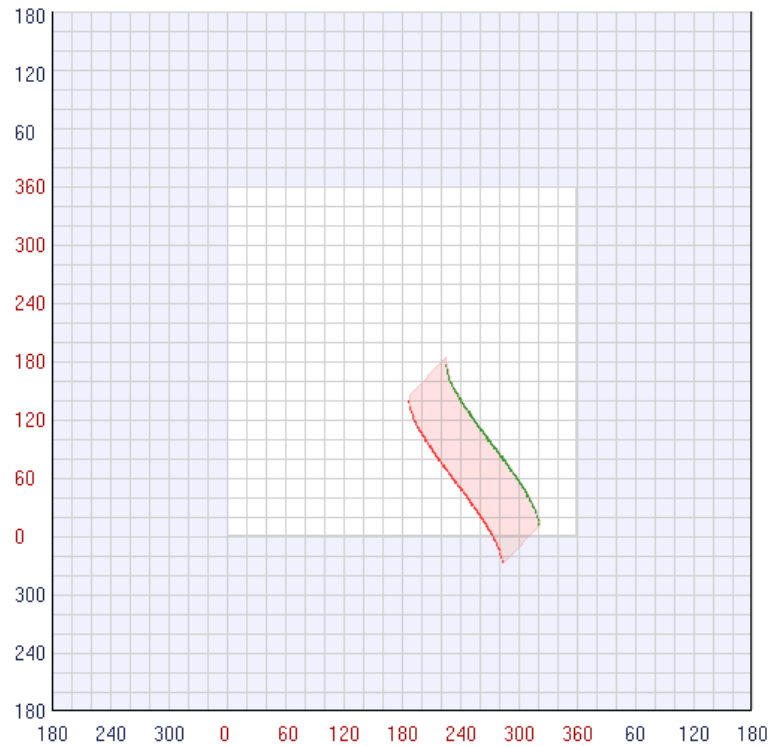


Рис. 3.8. Область S_{Dij} небезпечних курсів K_i и K_j при $V_i > V_j$

Умові зближення відповідає залежність $K_i = \pi + 2\gamma_{ij} - K_j$.

На рис. 3.9 показано область S_{Dij} небезпечних курсів K_i і K_j для тієї ж ситуації, але з $V_i=15$ вуз, $V_j=15$ вуз.

Якщо $V_i < V_j$, тобто $\rho_{ij} < 1$, то залежність між курсами суден K_i і K_j для випадку зближення виражається в такий спосіб:

$$K_i = \gamma_{ij} + \arcsin\{\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})]\}.$$

Оскільки $\rho_{ij} < 1$, то курс K_j приймає всі значення від 0 до 2π .

На рис. 3.10 наведено область S_{Dij} небезпечних курсів K_i і K_j для $V_i=20$ вуз, $V_j=15$ вуз.

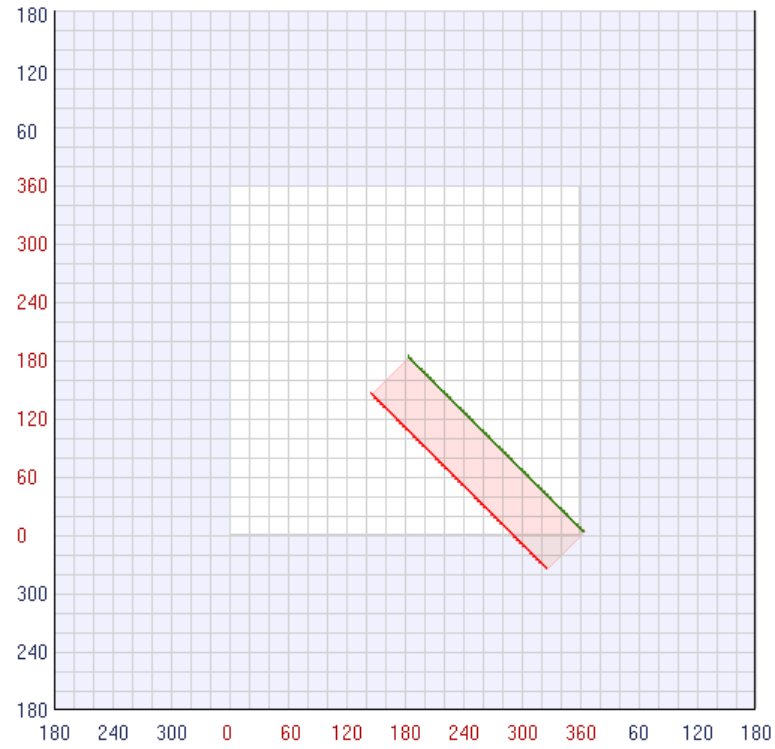


Рис. 3.9. Область S_{Dij} небезпечних курсів K_i і K_j при $V_i = V_j$

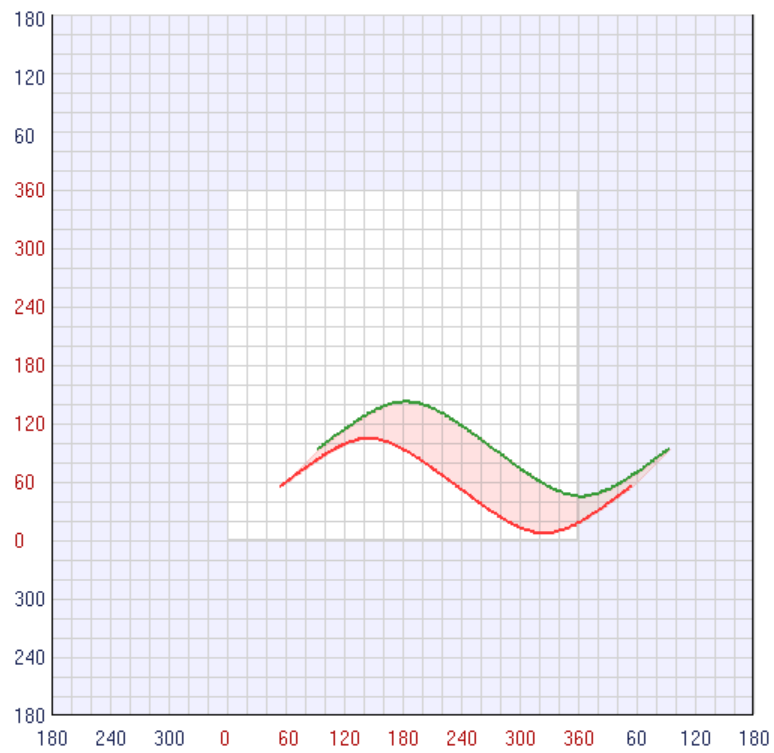


Рис. 3.10. Область S_{Dij} небезпечних курсів K_i і K_j при $V_i < V_j$

Таким чином, маючи в своєму розпорядженні небезпечну область S_{Dij} курсів двох суден можна вибрати їх безпечні курси ухилення, що забезпечують їх розбіжності на відстані, яке більше величини гранично-допустимої дистанції.

Відзначимо, що розглянута процедура визначення області небезпечних курсів не враховує двох істотних факторів, до яких відносяться інерційність судна при повороті і наявність можливих навігаційних небезпек в області маневрування суден.

3.3. Врахування в першому наближенні навігаційних небезпек і інерційності судна при виборі маневру розходження зміною курсу

Спочатку розглянемо врахування впливу інерційності судна при повороті на вибір безпечного маневру розбіжності. У попередньому підрозділі показано, що множина станів системи двох суден мінімальної динамічної системи, що небезпечно зближуються, Σ_{2s} доцільно представляти область небезпечних курсів, яка відображається на розширеній площині курсів суден, як показано на рис. 3.11.

Межами області є точки (K_1, K_2) , які задовольняють рівнянню:

$$\sin(K_2 - \gamma) = \frac{V_1}{V_2} \sin(K_1 - \gamma),$$

де $\gamma = \alpha \pm \arcsin \frac{D_d}{D}$, тут α і D - відповідно пеленг і дистанція між суднами, а D_d - гранично-допустимої дистанції зближення.

Якщо точка (K_1, K_2) знаходиться всередині області небезпечних курсів, то дистанція найкоротшого зближення $D_{\min}$ менше гранично-допустимої дистанції D_d , і зближення суден є небезпечним. У разі ж положення точки $(K_1,$

K_2) на межі або поза областю небезпечних курсів загроза зіткнення відсутня (рис. 3.11).

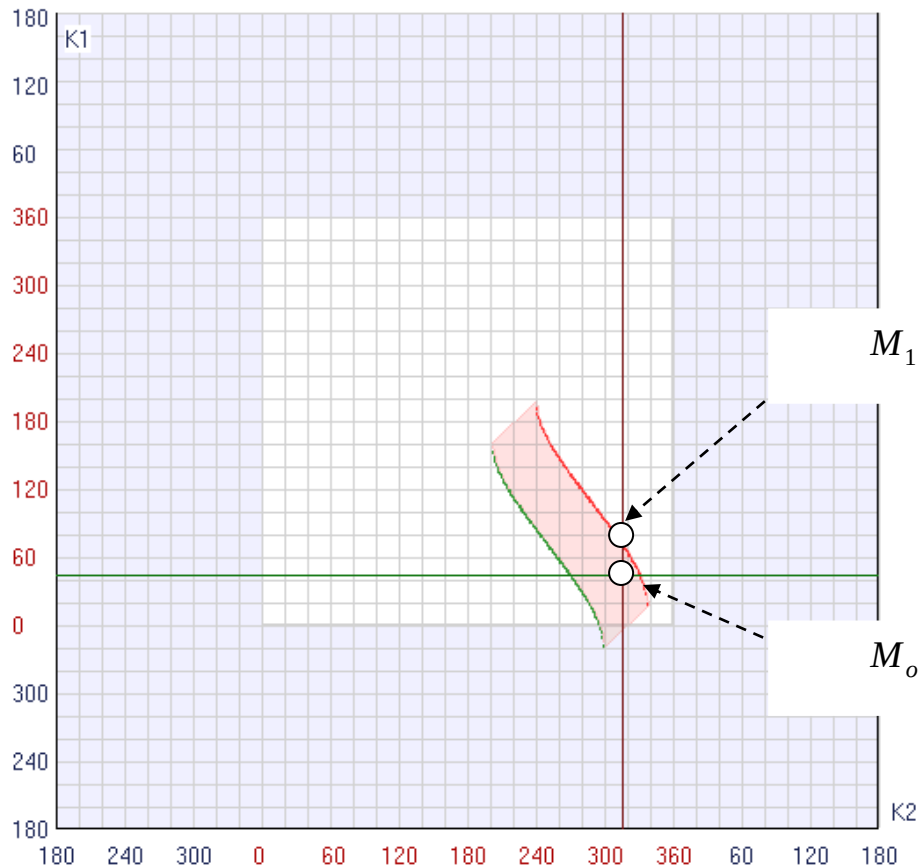


Рис. 3.11. Небезпечна область курсів системи Σ_{2s}

Якщо для пари суден точка M_o з програмними курсами (K_{1o} , K_{2o}) знаходиться в області небезпечних курсів, то маневром зміни курсів суден при їх незмінних швидкостях необхідно змінити стан системи Σ_{ns} , що відповідає точці $M_1(K_{1y}, K_{2y})$, яка не належить області небезпечних курсів, як показано на рис. 3.11. При цьому перехід зі стану ситуаційного збурювання, точка M_o (K_{1o} , K_{2o}), в безпечний стан $M_1(K_{1y}, K_{2y})$, потребує витрат, рівних мінімальним змінам курсів суден. У наведеному прикладі судно змінює курс з $K_{1o} = 45^\circ$ на $K_{1y} = 90^\circ$, а ціль не змінює свої параметри руху.

Ситуація небезпечного зближення характеризується наступними параметрами: $\alpha=90^\circ$, $D=3,0$ милі, $D_d=1,0$ милі, $V_1=15$ вузлів, $V_2=20$ вузлів, $K_{20}=315^\circ$.

Наведена на рис. 3.11 область небезпечних курсів не враховує інерційність судна при повороті, в результаті чого дистанція найкоротшого зближення менше гранично-допустимої дистанції D_d на величину ΔD_d , що дорівнює, як випливає з рис. 3.12, приращенню ΔR .

З рис. 3.12 випливає, що величина $\Delta D_d = \Delta R$ визначається виразом:

$$\Delta D_d = MN \sin(K_{oty}^* - \psi).$$

Якщо розглядати криволінійний рух судна в першому наближенні, то робимо припущення, що судно повертається з постійною кутовою швидкістю ω_p , і приращення координат Δx_{ot} і Δy_{ot} між точками M і N у відносному русі можна знайти з наступних міркувань.

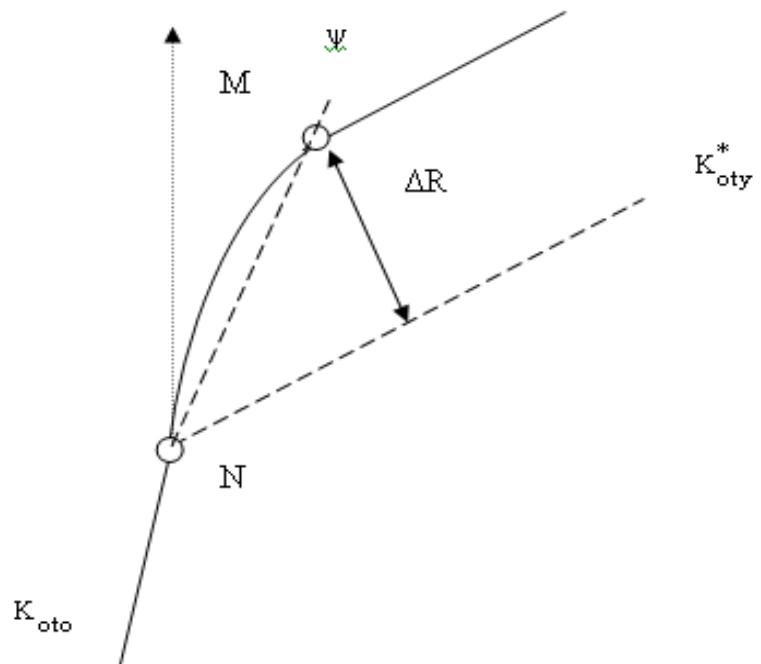


Рис. 3.12. Визначення величини ΔD_d

Очевидно, що приращення відносних координат Δx_{ot} і Δy_{ot} визначається зміною координат суден системи Σ_{2s} за час маневру τ :

$$\Delta x_{ot} = \Delta x_1 - \Delta x_2;$$

$$\Delta y_{ot} = \Delta y_1 - \Delta y_2,$$

де Δx_1 і Δy_1 - зміна координат маневруючого судна;

Δx_2 і Δy_2 - зміна координат цілі, що зберігає незмінними параметри свого руху.

При повороті судна з постійною кутовою швидкістю зміна курсу судна описується диференціальним рівнянням, яке має наступний вигляд:

$$\dot{K} = k_{\omega} \beta_k,$$

де k_{ω} - коефіцієнт ефективності керма;

β_k - кут кладки пера керма.

Оскільки $\dot{K} = \omega_p$, вихідне рівняння можна записати у вигляді:

$$\omega_p = k_{\omega} \beta_k = a_{\omega},$$

інтегруючи яке, отримаємо вираз для поточного курсу судна K , як функцію часу, тобто.:

$$K = K_{10} + \int_0^t \omega_p d\tau = K_{10} + \int_0^t a_{\omega} d\tau.$$

Таким чином, в загальному вигляді отримуємо вираз для курсу судна в функції часу t :

$$K = K_{10} + a_{\omega} t .$$

Прирошення курсу $\Delta K = K_{1y} - K_{10}$ за час повороту τ :

$$\Delta K = a_{\omega} \tau \text{ или } \tau = \Delta K / a_{\omega} . \quad (3.15)$$

За час маневрування τ зміна координат судна визначається наступними виразами:

$$\Delta x_1 = \int_0^{\tau} V_1 \sin [K_{10} + K(t)] dt ,$$

$$\Delta y_1 = \int_0^{\tau} V_1 \cos [K_{10} + K(t)] dt .$$

Підставляючи вираз для $K(t)$, отримаємо:

$$\Delta x_1 = \int_0^{\tau} V_1 \sin (K_{10} + a_{\omega} t) dt , \quad \Delta y_1 = \int_0^{\tau} V_1 \cos (K_{10} + a_{\omega} t) dt .$$

Вираз для Δx_1 має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 = \int_0^{\tau} V_1 \sin (K_{10} + a_{\omega} t) dt &= V_1 \sin K_{10} \int_0^{\tau} \cos (a_{\omega} t) dt + \rightarrow \\ &V_1 \cos K_{10} \int_0^{\tau} \sin (a_{\omega} t) dt . \end{aligned}$$

Якщо ввести позначення $\Im s = \int_0^{\tau} \sin (a_{\omega} t) dt$ і $\Im c = \int_0^{\tau} \cos (a_{\omega} t) dt$, то

вираз для Δx_1 приймає наступний вигляд:

$$\Delta x_1 = V_1(\sin K_{10} \Im c + \cos K_{10} \Im s).$$

Вирази для інтегралів $\Im s$ і $\Im c$ мають вигляд:

$$\Im s = \int_0^{\tau} \sin(a_{\omega} t) dt = -\frac{1}{a_{\omega}} \cos(a_{\omega} t) \Big|_0^{\tau} = -\frac{1}{a_{\omega}} [\cos(a_{\omega} \tau) - 1].$$

$$\Im c = \int_0^{\tau} \cos(a_{\omega} t) dt = \frac{1}{a_{\omega}} \sin(a_{\omega} t) \Big|_0^{\tau} = \frac{1}{a_{\omega}} \sin(a_{\omega} \tau).$$

З урахуванням отриманих виразів для шуканих інтегралів запишемо змінення координати Δx_1 в наступному вигляді:

$$\Delta x_1 = \frac{V_1}{a_{\omega}} \{ \sin K_{10} \sin(a_{\omega} \tau) - \cos K_{10} [\cos(a_{\omega} \tau) - 1] \}.$$

Враховуємо, що $\Delta K = a_{\omega} \tau$, тому вираз для Δx_1 приймає вигляд:

$$\Delta x_1 = \frac{V_1}{a_{\omega}} [\sin K_{10} \sin \Delta K - \cos K_{10} (\cos \Delta K - 1)] = \frac{V_1}{a_{\omega}} [\cos K_{10} - \cos(K_{10} + \Delta K)]$$

.

Звертаємо увагу, що справедливе співвідношення $K_{10} + \Delta K = K_{1y}$, де K_{1y} - курс другої ділянки траєкторії судна, тому можна остаточно записати вираз для Δx_1 :

$$\Delta x_1 = \frac{V_1}{a_{\omega}} (\cos K_{10} - \cos K_{1y}).$$

Аналогічно для приращення другої координати Δy_1 :

$$\Delta y_1 = \int_0^{\tau} V_1 \cos[K_{10} + K(t)] dt = V_1 \cos K_{10} \int_0^{\tau} \cos(a_{\omega} t) dt \rightarrow$$

$$- V_1 \sin K_{10} \int_0^{\tau} \sin(a_{\omega} t) dt, \quad \text{або}$$

$$\Delta y_0 = \frac{V_1}{a_{\omega}} \{ \cos K_{10} \sin(a_{\omega} \tau) + \sin K_{10} [\cos(a_{\omega} \tau) - 1] \}.$$

Аналогічно попередньому випадку для Δy_1 отримуємо:

$$\Delta y_1 = \frac{V_1}{a_{\omega}} (\sin K_{1y} - \sin K_{10}).$$

Таким чином, підбиваючи отримані підсумки, можна відзначити, що розрахунок приращення координат Δx_1 і Δy_1 проводиться за наступними формулами:

$$\Delta x_1 = \frac{V_1}{a_{\omega}} (\cos K_{10} - \cos K_{1y}),$$

$$\Delta y_1 = \frac{V_1}{a_{\omega}} (\sin K_{1y} - \sin K_{10}).$$

(3.16)

Змінення координат цілі Δx_2 і Δy_2 за час повороту τ , враховуючи незмінні параметри її руху, визначаються наступними очевидними виразами:

$$\Delta x_2 = V_2 \tau \sin K_{20};$$

$$\Delta y_2 = V_2 \tau \cos K_{20}.$$

З урахуванням отриманих виразів Δx_1 , Δy_1 , Δx_2 і Δy_2 , а також тривалості повороту τ прирощення координат Δx_{ot} і Δy_{ot} приймають такий вигляд:

$$\Delta x_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\cos K_{10} - \cos K_{1y}) - V_2 \frac{K_{1y} - K_{10}}{\omega_p} \sin K_{20},$$

$$\Delta y_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\sin K_{1y} - \sin K_{10}) - V_2 \frac{K_{1y} - K_{10}}{\omega_p} \cos K_{20},$$

де перша складова - криволінійний рух судна при повороті, а друга складова - прямолінійний рух цілі без зміни параметрів руху.

Очевидно, розрахунок відрізка проводиться за допомогою формули:

$$MN = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2},$$

а кут ψ знаходиться зі співвідношення:

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{\Delta x_{ot}}{\Delta y_{ot}}.$$

Отже, остаточно вираз для ΔD_d має вигляд:

$$\Delta D_d = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2} \sin(K_{oty}^* - \operatorname{arctg} \frac{\Delta x_{ot}}{\Delta y_{ot}}).$$

Величина ΔD_d , розрахована для повороту судна з курсу $K_{10} = 45^\circ$ на

курс $K_{1y} = 90^\circ$ з кутовою швидкістю $\omega_p = 1^\circ/\text{с}$ при тих же параметрах ситуації небезпечного зближення становить близько 0,45 милі. Тому необхідно проводити розрахунок області небезпечних курсів для граничної дистанції $D_d + \Delta D_d = 1,45$ милі, як показано на рис. 3.13.

Звертаємо увагу, що точка M_1 , яка була допустимою для області, показаної на рис. 3.11, з урахуванням інерційності судна при повороті знаходиться в області небезпечних курсів, яка наведена на рис. 3.13. Тому для безпечного розходження судна з ціллю, яка слідує з незмінними параметрами руху, судно повинно змінити свій курс на $K_{1y} = 110^\circ$ (точка M_2), що забезпечить розходження суден на найкоротшій дистанції не менше 1 милі.

Таким чином, для врахування інерційності судна при повороті необхідно визначити в першому наближенні курс ухилення судна і розрахувати приращення ΔD_d гранично допустимої дистанції, з урахуванням якого сформувати уточнену область небезпечних курсів, і визначити курси безпечного розходження суден.

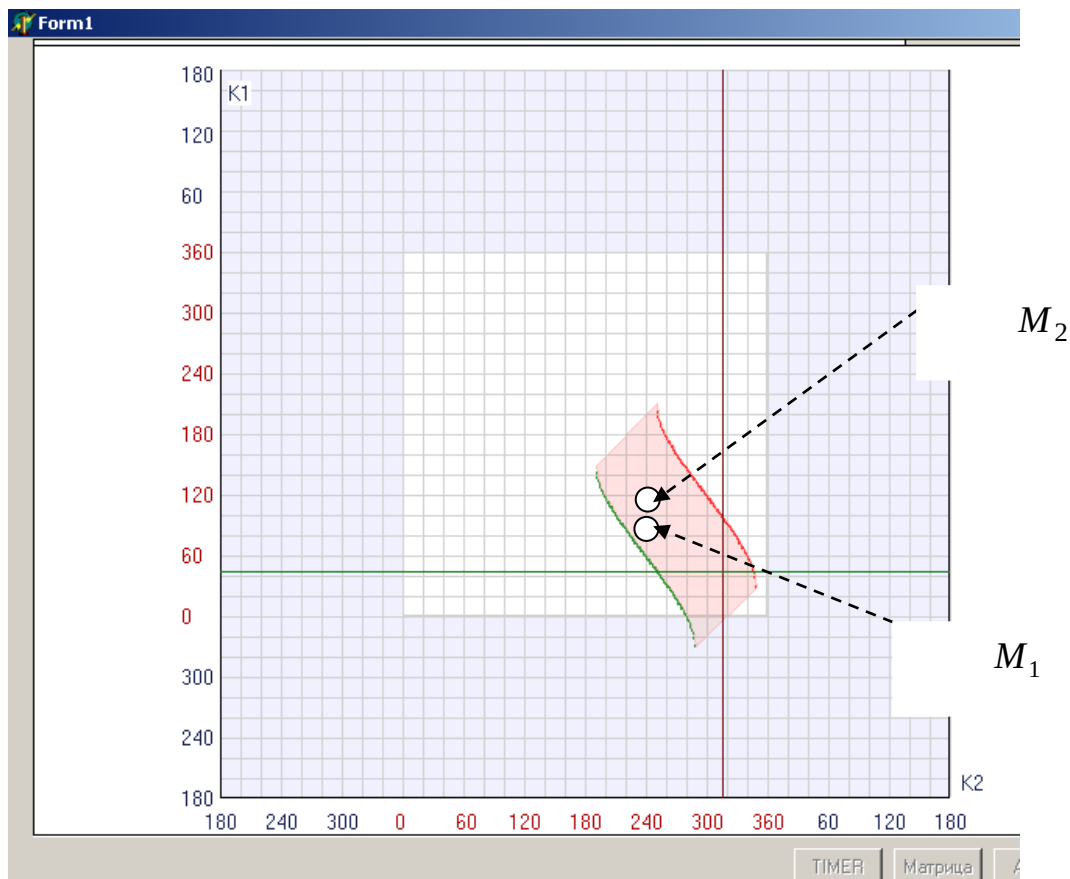


Рис. 3.13. Небезпечна область курсів системи Σ_{ns} з урахуванням інерційності судн

У разі використання інших динамічних моделей поворотності судна значення ΔD_d розраховується аналогічно, тобто спочатку слід визначити тривалість повороту судна τ , а потім прирошення відносних координат Δx_{ot} і Δy_{ot} . Дане питання буде розглянуто нижче в інших підрозділах.

Тут же розглянемо основну ідею врахування навігаційних небезпек при формуванні областей небезпечних курсів. Припустимо, в області зближення суден мінімальної динамічної системи Σ_{2s} знаходиться навігаційна небезпека. Як показано в роботі [44], навігаційні небезпеки поділяються на три типи: точкові, лінійні розподілені і складні розподілені.

В даному підрозділі припустимо, що в районі маневрування суден знаходиться точкова навігаційна небезпека. Її параметрами є пеленг α_n з судна на ціль, дистанція D_n до цілі і гранично допустима дистанція $\hat{D}_n$ її проходження. Для того, щоб уникнути посадки на мілину при розходженні, судно повинно уникати курсів ухилення, укладених між граничними значеннями курсів ухилення $K_{yn}^{(p)}$ і $K_{yn}^{(s)}$, які показані на рис. 3.14.

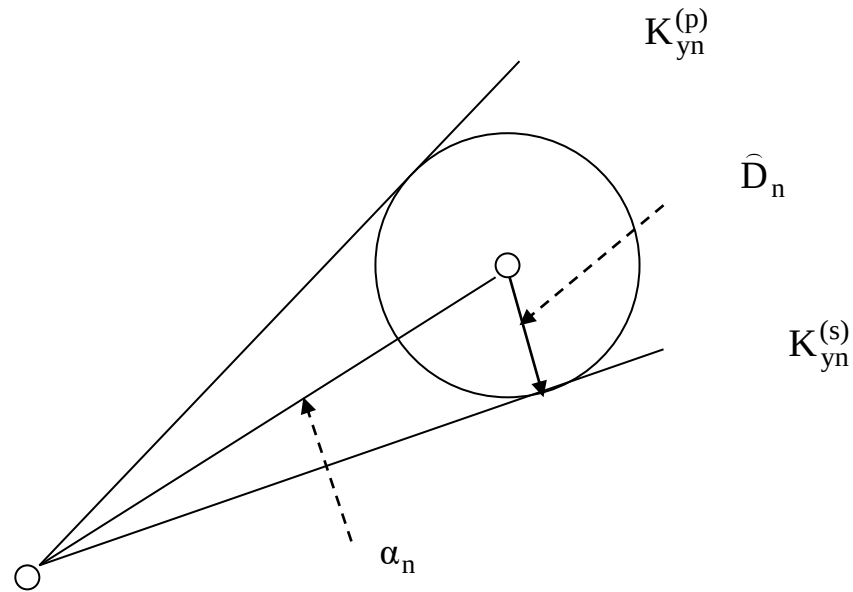


Рис. 3.14. Граничні курси ухилення

Знайдемо аналітичні вирази для граничних курсів ухилення. З рис. 3.14 випливає:

$$\sin(K_{yn}^{(s)} - \alpha_n) = \frac{\hat{D}_n}{D_n},$$

звідки:

$$K_{yn}^{(s)} = \alpha_n + \arcsin \frac{\hat{D}_n}{D_n}.$$

Аналогічно отримуємо вираз для другого граничного курсу ухилення $K_{yn}^{(p)}$:

$$K_{yn}^{(p)} = \alpha_n - \arcsin \frac{\hat{D}_n}{D_n}.$$

Таким чином, множина неприпустимих курсів ухилення судна M_n визначається виразом $M_n = [K_{yn}^{(s)}, K_{yn}^{(p)}]$. Курс ухилення судна K_y при розход-

женні не повинен належати множині неприпустимих курсів M_n , тобто $K_y \notin M_n$.

При зовнішньому управлінні розходженням суден необхідно враховувати граничні курси ухилення обох суден відносно наявної точкової навігаційної небезпеки. У цьому випадку на розширеній площині курсів крім небезпечних областей курсів необхідно відобразити множини неприпустимих курсів M_{n1} і M_{n2} , що виникають через точкову навігаційну небезпеку.

Для цього необхідно розрахувати граничні значення курсів ухилення обох суден за допомогою виразів:

$$K_{yn1}^{(s)} = \alpha_{n1} + \arcsin \frac{\hat{D}_n}{D_{n1}};$$

$$K_{yn1}^{(p)} = \alpha_{n1} - \arcsin \frac{\hat{D}_n}{D_{n1}};$$

$$K_{yn2}^{(s)} = \alpha_{n2} + \arcsin \frac{\hat{D}_n}{D_{n2}};$$

$$K_{yn2}^{(p)} = \alpha_{n2} - \arcsin \frac{\hat{D}_n}{D_{n2}}.$$

Необхідні для розрахунку граничних курсів значення α_{n1} , D_{n1} , α_{n2} і D_{n2} можна знайти, знаючи координати φ_1 , λ_1 , φ_2 , λ_2 суден, що зближаються, і точкової цілі φ_n , λ_n за допомогою наступних формул:

$$D_{n1} = \sqrt{(\varphi_n - \varphi_1)^2 + (\lambda_n - \lambda_1)^2};$$

$$\alpha_{n1} = \arcsin \frac{\lambda_n - \lambda_1}{\cos \varphi_n D_{n1}};$$

$$D_{n2} = \sqrt{(\varphi_n - \varphi_2)^2 + (\lambda_n - \lambda_2)^2};$$

$$\alpha_{n2} = \arcsin \frac{\lambda_n - \lambda_2}{\cos \varphi_n D_{n2}}.$$

Розглянемо ситуацію небезпечного зближення суден при наявності точкової навігаційної небезпеки. Параметри ситуації зближення мають таке значення $V_1 = 10$ вуз., $V_2 = 20$ вуз., $D = 3$ милі, $\alpha = 0^\circ$, $D_d = 1$ миля, $\hat{D}_n = 0,5$ милі, $\alpha_{n1} = 27^\circ$, $D_{n1} = 2,24$ милі, $\alpha_{n2} = 135^\circ$, $D_{n2} = 1,41$ милі. Ситуацію відображено на рис. 3.15.

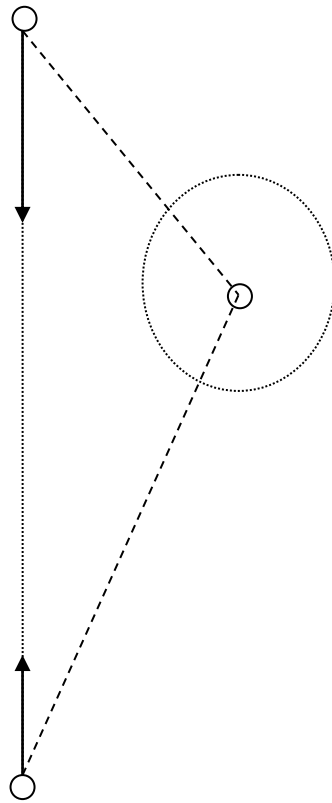


Рис. 3.15. Вихідна ситуація небезпечного зближення

Для даної ситуації отримані наступні граничні неприпустимі курси:
 $K_{yn1}^{(s)}=39,9^\circ$, $K_{yn1}^{(p)}=14,1^\circ$, $K_{yn2}^{(s)}=155,8^\circ$, $K_{yn2}^{(p)}=114,2^\circ$. Область небезпечних курсів з урахуванням точкової навігаційної небезпеки показано на рис. 3.16.

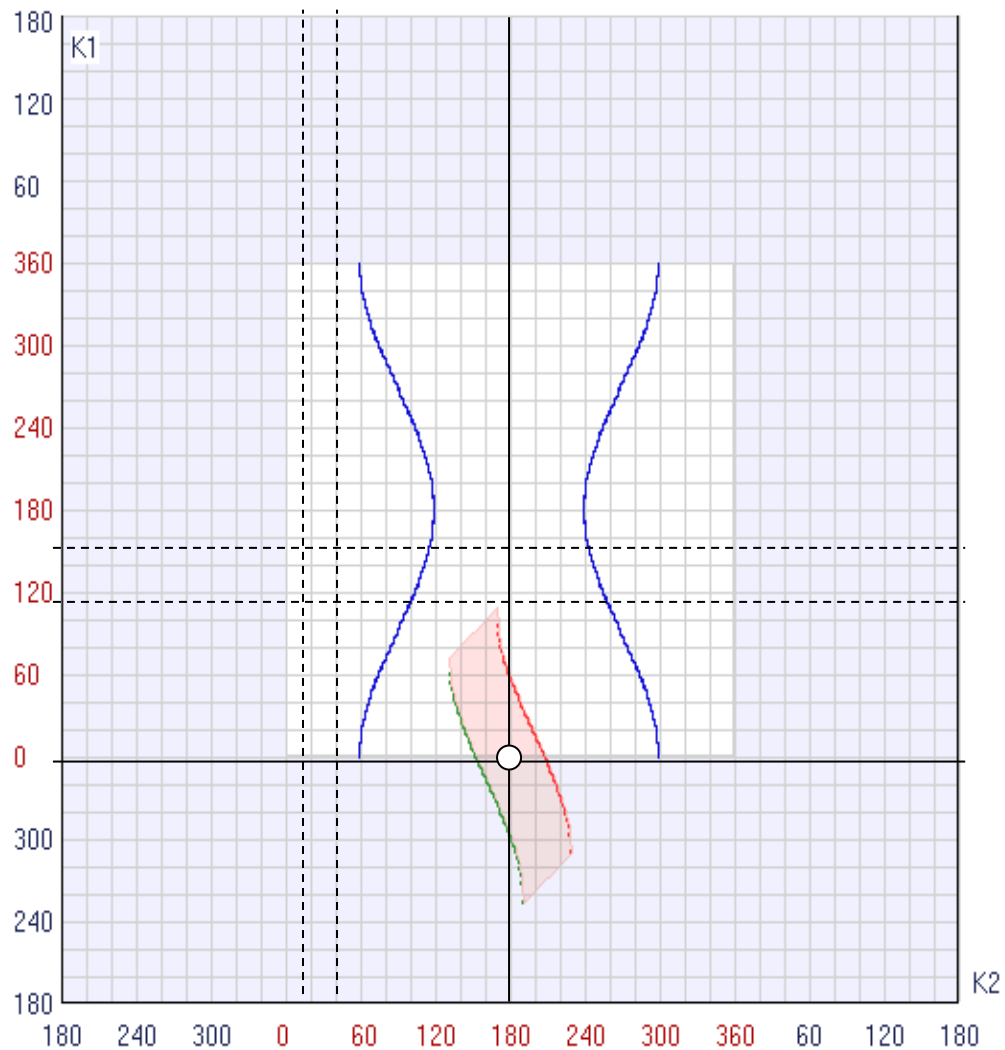


Рис. 3.16. Область S_{Dij} з урахуванням точкової навігаційної небезпеки

При проходженні суден початковими курсами $K_1=0$ і $K_2=180$ відповідна точка, як випливає з рис. 3.16, належить області небезпечних курсів. При виборі маневру розходження слід уникати вибору точок, що знаходяться між пунктирними лініями.

3.4. Висновки за третім розділом.

У третьому розділі розглянуто мінімальну динамічну систему, поточний стан якої залежить від керуючих впливів обох суден. Проведено формалізацію мінімальної динамічної системи, розглянуто простір істинного руху суден системи і простір відносного руху. Отримано аналітичні вирази перетворення параметрів дійсного руху в параметри відносного руху, також наведені зворотні перетворення відносних параметрів в справжні параметри.

Розглянуто ситуаційні збурювання, які виникають при небезпечному зближенні суден. Показано, що ситуаційні збурювання можуть приймати два значення, які визначають стандартне маневрування і екстрене маневрування при надмірному зближенні.

Наведено поняття області небезпечних курсів мінімальної динамічної системи. Показано, що при різних співвідношеннях швидкостей суден мінімальної динамічної системи області небезпечних курсів можуть приймати різні форми. Розглянуто використання області небезпечних курсів для вибору безпечного маневру розходження зміною курсів.

Розглянуто в першому наближенні врахування навігаційних небезпек і інерційності судна при виборі маневру розходження зміною курсу за допомогою області небезпечних курсів.

РОЗДІЛ 4.

ФОРМУВАННЯ ОБЛАСТІ НЕБЕЗПЕЧНИХ КУРСІВ З УРАХУВАННЯМ ІНЕРЦІЙНОСТІ СУДНА І НАВІГАЦІЙНИХ НЕБЕЗПЕК

4.1. Вплив інерційності судна при повороті на форму області небезпечних курсів пари суден

В останньому підрозділі попереднього розділу розглядався в першому наближенні вплив інерційності судна на дистанцію найкоротшого зближення при виборі маневру розбіжності за допомогою області небезпечних курсів, яка сформована без урахування динаміки маневруючих суден. Було показано, що інерційність при повороті скорочує дистанцію найкоротшого зближення на величину ΔD_d . У попередньому розділі розглядався випадок, коли одне з суден маневрувало, а друге - прямувало з постійним курсом і швидкістю. В даному підрозділі будемо робити вибір маневру розбіжності зміною курсів обох суден. У третьому розділі отримали вираз для розрахунку приращення дистанції ΔD_d , яке має наступний вигляд (рис. 3.12):

$$\Delta D_d = MN \sin(K_{oty}^* - \psi),$$

де MN - відстань між точками початку N і кінця M повороту судна у відносному русі;

ψ - напрямок з точки N на точку M ;

K_{oty}^* - відносний курс ухилення суден, що зближуються.

Очевидно, що приращення відносних координат Δx_{ot} і Δy_{ot} визначається зміною координат суден за час маневру:

$$\Delta x_{ot} = \Delta x_1 - \Delta x_2;$$

$$\Delta y_{ot} = \Delta y_1 - \Delta y_2,$$

де Δx_1 і Δy_1 - зміна координат першого судна;

Δx_2 і Δy_2 - зміна координат другого судна.

Очевидно, відстань MN і напрямок ψ пов'язані з прирощеннями відносних координат Δx_{ot} і Δy_{ot} за допомогою таких виразів:

$$MN = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2},$$

$$\psi = \arctg \frac{\Delta x_{ot}}{\Delta y_{ot}}.$$

Отже, остаточно вираз для розрахунку ΔD_d має вигляд:

$$\Delta D_d = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2} \sin(K_{oty}^* - \arctg \frac{\Delta x_{ot}}{\Delta y_{ot}}).$$

(4.1)

Значення відносного курсу ухилення K_{oty}^* залежить від вибраних курсів ухилення суден K_{1y} і K_{2y} , причому:

$$K_{oty}^* = \alpha - \arcsin(D_d/D).$$

(4.2)

Очевидно, для розрахунку ΔD_d необхідно знати прирощення координат Δx_1 , Δy_1 , Δx_2 і Δy_2 обох суден за час їх поворотів для виконання маневру розбіжності, причому зазначені прирощення координат залежать від форми криволінійної траєкторії руху кожного судна при виконанні повороту. Тому

розглянемо різні моделі обертального руху судна для опису його повороту і оцінки величини прирощення координат.

У попередньому розділі були отримані вирази для прирощення координат Δx_i і Δy_i оперуючого судна у результаті повороту при розрахунку їх за моделлю обертального руху судна з постійною кутовою швидкістю ω_p (3.16):

$$\begin{aligned}\Delta x_i &= \frac{V_i}{\omega_p} (\cos K_{i0} - \cos K_{iy}), \\ \Delta y_i &= \frac{V_i}{\omega_p} (\sin K_{iy} - \sin K_{i0}).\end{aligned}\quad (4.3)$$

Якщо для опису повороту судна застосовується модель його обертального руху, яка враховує інерційність при повороті і нерівномірну зміну кутової швидкості повороту, то з роботи [89] можна запозичити необхідні аналітичні вирази, що характеризують тривалість першої τ_1 і другої τ_2 фаз повороту, а також прирощення координат судна Δx_i і Δy_i в результаті виконання повороту, причому:

$$\begin{aligned}\Delta x_i &= \int_0^{\tau_1} V_i \sin K^{(1)} dt + \int_0^{\tau_2} V_i \sin K^{(2)} dt, \\ \Delta y_i &= \int_0^{\tau_1} V_i \cos K^{(1)} dt + \int_0^{\tau_2} V_i \cos K^{(2)} dt,\end{aligned}\quad (4.4)$$

де $K^{(1)}$ и $K^{(2)}$ - вираження для курсу судна на першій і другій фазах повороту.

Загальноприйняті дві основні моделі обертального руху судна, які враховують інерційність судна [134]. У першій моделі обертальний рух судна описується диференціальним рівнянням другого порядку зміни його курсу при

повороті, а тривалість першої τ_1 і другої τ_2 фаз повороту визначаються методом простих ітерацій з рівняння:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= T_1 [1 - \exp(-\tau_1/T_1)] + \tau_2 - T_1 [2 - \exp(-\tau_1/T_1)][1 - \exp(-\tau_2/T_1)] + \Delta K_i / \omega_p, \\ \tau_2 &= T_1 \ln [2 - \exp(-\tau_1/T_1)],\end{aligned}\quad (4.5)$$

де $\Delta K_i = K_{iy} - K_{i0}$, T_1 - постійна часу, що характеризує інерційність судна при обертальному русі. Початковим наближенням в ітераційному циклі приймається $\tau_1 = \Delta K_i / \omega_p$.

У свою чергу, вирази для курсу судна на першій і другій фазах повороту $K^{(1)}$ і $K^{(2)}$ мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}K^{(1)} &= K_0 + \omega_p \{t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)]\}, \\ K^{(2)} &= K^{(1)}(\tau_1) + \omega_p \{T_1 [2 - \exp(-\tau_1/T_1)][1 - \exp(-t/T_1)] - t\}.\end{aligned}\quad (4.6)$$

Обертальний рух судна при зміні курсу в другій моделі описується диференціальним рівнянням третього порядку. За допомогою методу простих ітерацій визначаються значення інтервалів часу τ_1 і τ_2 на першій і другій фазах повороту судна [134]:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \tau_2 + \{T_1^2 [1 - \exp(-\tau_1/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\tau_1/T_2)]\} / (T_1 - T_2) - \\ &\quad - \{2 - [T_1 \exp(-\tau_1/T_1) - T_2 \exp(-\tau_1/T_2)]\} / (T_1 - T_2) \times \\ &\quad \times \{T_1^2 [1 - \exp(-\tau_2/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\tau_2/T_2)]\} / (T_1 - T_2) + \Delta K_i / \omega_p, \\ \tau_2 &= -T_1 \ln \{(T_2/T_1) \exp(-\tau_2/T_2) + [(T_1 - T_2)/T_1] L^{-1}\},\end{aligned}\quad (4.7)$$

де $L = 2 - [T_1 \exp(-\tau_1/T_1) - T_2 \exp(-\tau_1/T_2)] / (T_1 - T_2)$.

T_1 і T_2 - постійні часу, що характеризують інерційність судна при обертальному русі.

В якості початкових наближень приймаються $\tau_1 = \Delta K_i / \omega_p$ і $\tau_2 = 0$. Для розрахунку приращення координат судна при повороті застосовуються вирази курсу на першій і другій фазах:

$$K^{(1)} = K_0 + \omega_p \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \},$$

$$K^{(2)} = K^{(1)}(\tau_1) - \omega_p t + \omega_p \{ 2 - [T_1 \exp(-\tau_1/T_1) - T_2 \exp(-\tau_1/T_2)] / (T_1 - T_2) \} \times$$

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

(4.8)

Як приклад зробимо чисельну оцінку значень приращення гранично-допустимої дистанції зближення $\Delta D_d^{(1)}$, $\Delta D_d^{(2)}$ і $\Delta D_d^{(3)}$ для вищерозглянутих моделей обертального руху судна в разі, коли маневр розходження зміною курсу виконує тільки одне з суден, а друге зберігає незмінні параметри руху. В цьому випадку приращення координат Δx_2 і Δy_2 прямолінійного руху другого судна виражаються наступним чином:

$$\Delta x_2 = V_2 \tau \sin K_2, \quad \Delta y_2 = V_2 \tau \cos K_2,$$

де τ - тривалість повороту першого судна.

Очевидно, приращення відносних координат оцінюється за допомогою виразів:

$$\begin{aligned}\Delta x_{ot} &= \Delta x_1 - V_2 \tau \sin K_2; \\ \Delta y_{ot} &= \Delta y_1 - V_2 \tau \cos K_2.\end{aligned}\tag{4.9}$$

Для розглянутого прикладу візьмемо характеристики поворотності балкера «Sheila Ann» при куті кладки пера керма 10° , які були отримані натурними спостереженнями в реальних умовах експлуатації [93]: $\omega_p = a_\omega = 0,5422$ градус/с, $T_1 = 19$ с, $T_2 = 2,3$ с. У прикладі розглянута наступна ситуація небезпечного зближення: $K_1 = 45^\circ$, $V_1 = 15$ вузлів, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 20$ вузлів, $\alpha = 100^\circ$, $D = 3$ милі, $D_d = 1$ миля. У даній ситуації прогнозована дистанція найкоротшого зближення $D_{min} = 0,1$ милі. Сама ситуація небезпечного зближення із зазначеними параметрами показана на рис. 4. 1.

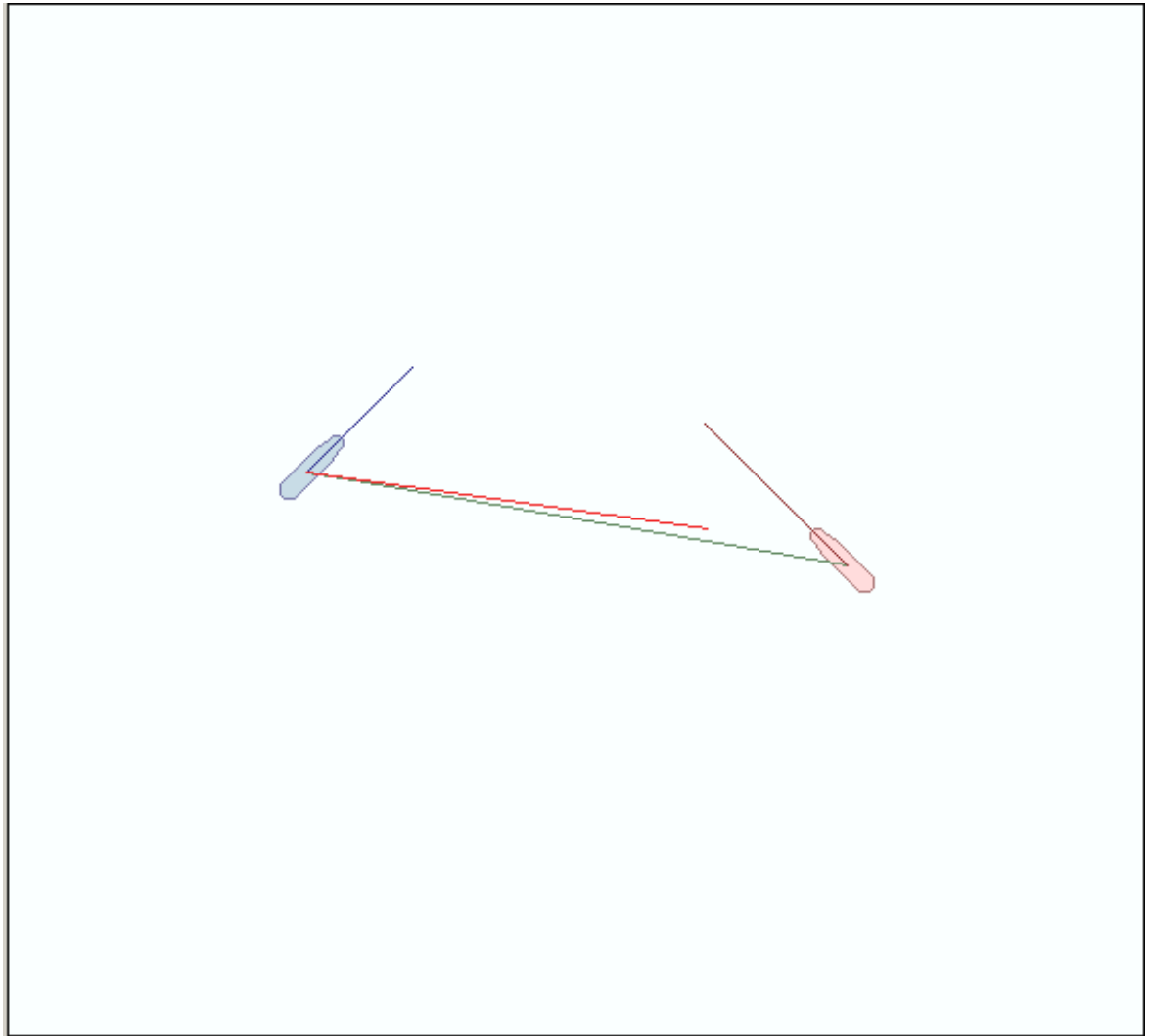


Рис. 4.1. Ситуація небезпечного зближення суден

Для визначення безпечного курсу ухилення за допомогою області небезпечних курсів S_{Dij} , яка показана на рис. 4.2, значення курсу першого судна збільшувалося від значення $K_1 = 45^\circ$ до точки перетину прямої, що відповідає курсу другого судна $K_2 = 315^\circ$, з верхньою межею області небезпечних курсів S_{Dij} . У цьому випадку, як впливає з рис. 4.2, курс ухилення першого судна $K_{1y} = 98^\circ$.



Рис. 4.2. Вибір курсу ухилення K_{1y} першим судном

Знайдемо прирощення $\Delta D_d^{(1)}$ в разі застосування моделі обертального руху судна з постійною кутовою швидкістю. Для цього скористаємося виразом (4.3) для розрахунку прирощення координат першого судна Δx_1 і Δy_1 , а прирощення відносних координат (4.9) з урахуванням $\tau = \frac{K_{1y} - K_1}{\omega_p}$ приймає

вигляд:

$$\Delta x_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\cos K_1 - \cos K_{1y}) - V_2 \left(\frac{K_{1y} - K_1}{\omega_p} \right) \sin K_2;$$

$$\Delta y_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\sin K_{1y} - \sin K_1) - V_2 \left(\frac{K_{1y} - K_1}{\omega_p} \right) \cos K_2.$$

Тривалість повороту склала $\tau = 99,6$ с, прирощення координат першого судна Δx_1 і Δy_1 за цей час і другого судна Δx_2 і Δy_2 :

$$\Delta x_1 = 703,6 \text{ м}, \quad \Delta y_1 = 228,7 \text{ м}, \quad \Delta x_2 = -724,3 \text{ м}, \quad \Delta y_2 = 723,7 \text{ м},$$

отже: $\Delta x_{\text{от}} = 1427,9$ м, $\Delta y_{\text{от}} = -495,0$ м, а також $MN = 1511,2$ м, $\psi = -70,9^\circ$ і $\Delta D_d^{(1)} = 0,154$ милі.

У разі опису повороту судна першою моделлю обертального руху, що враховує інерційність при повороті, в результаті розрахунку за формулами (4.5) отримали тривалість першої і другої фаз повороту $\tau_1 = 112,7$ с і $\tau_2 = 13,1$ с, прирощення координат першого судна $\Delta x_1 = 871,3$ м і $\Delta y_1 = 313,3$ м, а також другого судна $\Delta x_2 = -915,4$ м, $\Delta y_2 = 914,3$ м. Тому $\Delta x_{\text{от}} = 1786,7$ м, $\Delta y_{\text{от}} = -601,4$ м, $MN = 1885,2$ м, $\psi = -71,4^\circ$ і $\Delta D_d^{(2)} = 0,201$ милі.

При оцінці прирощення $\Delta D_d^{(3)}$ за допомогою другої моделі обертального руху судна, що враховує інерційність при повороті, тривалість обох фаз повороту судна розраховується за допомогою виразів (4.7), а для обчислення прирощення координат першого судна Δx_1 і Δy_1 використовуються формули (4.8) для курсів судна на першій і другій фазах повороту. В результаті розрахунку отримано тривалість першої і другої фаз повороту $\tau_1 = 115,2$ с і $\tau_2 = 13,2$ с, для першого судна прирощення координат $\Delta x_1 = 881,6$ м і $\Delta y_1 = 325,4$ м, для другого судна $\Delta x_2 = -934,1$ м, $\Delta y_2 = 933,4$ м. Следовательно, приращения относительных координат $\Delta x_{\text{от}} = 1815,7$ м і $\Delta y_{\text{от}} = -608,0$ м. Остаточно отримаємо $MN = 1914,8$ м, $\psi = -71,5^\circ$ і $\Delta D_d^{(2)} = 0,206$ милі.

Таким чином, при розрахунку меж області небезпечних курсів S_{Dij} за допомогою виразу (4.10) вибір маневру розходження курсом ухилення судна K_{1y} , забезпечує положення точки (K_{1y}, K_2) на межі області S_{Dij} , замість очікуваної дистанції розходження 1 миля в кращому випадку забезпечить меншу дистанцію, як впливає з прикладу, рівну 0,846 милі, а при більш ко-

ректному обліку інерційності судна при повороті за допомогою другої моделі обертального руху дистанція зближення складе 0,794 милі. Тому при розрахунку меж області небезпечних курсів S_{Dij} слід гранично-допустиму дистанцію зближення збільшити на $\Delta D_d^{(3)}$, тобто в наведеному прикладі при розрахунку меж області небезпечних курсів слід вибрати D_d замість 1 милі рівній 1,206 милі, що забезпечить найкоротше зближення на відстані 1 миля при використанні області S_{Dij} . Звертаємо увагу, що значення $\Delta D_d^{(2)}$ і $\Delta D_d^{(3)}$, розраховані відповідно за першою і другою моделями обертального руху судна, що враховує інерційність при повороті, для наведеного прикладу відрізняються на 0,005 милі або 9 метрів. Тому для обліку інерційності судна при повороті достатньо застосування першої моделі обертального руху.

Розглянемо процедуру обліку інерційності судна в процесі обертального руху при формуванні області небезпечних курсів S_{Dij} .

При розрахунку меж області небезпечних курсів S_{Dij} без урахування інерційності судів використовувалася залежність:

$$K_i = \gamma_{ij} + \arcsin\{\rho_{ij}[\sin(K_j - \gamma_{ij})]\}, \quad (4.10)$$

в якій прийнято $\gamma_{ij} = \alpha_{ij} - \arcsin \frac{D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}$.

Тому вираз (4.10) приймає наступний вигляд:

$$K_i = \alpha_{ij} - \arcsin \frac{D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}} + \arcsin\{\rho_{ij}[\sin(K_j - \alpha_{ij} - \arcsin \frac{D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}})]\}. \quad (4.11)$$

Для формування області небезпечних курсів S_{Dij} з урахуванням інерційності суден при повороті в рівняннях меж необхідно гранично-допустиму дистанцію D_d збільшити на величину прирощення дистанції ΔD_d , тобто рівняння меж (4.11) набирає вигляду:

$$K_{iy} = \alpha_{ij} - \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}} + \arcsin \{ \rho_{ij} [\sin(K_{jy} - \alpha_{ij} - \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{\Delta_{ij} D_{ij}})] \}. \quad (4.12)$$

Розглянемо врахування інерційності при повороті суден в разі $V_1 > V_2$, коли оцінка небезпеки зближення і вибір курсів ухилення визначається за допомогою області S_{Dij} , яка побудована без урахування інерційності суден тільки з урахуванням гранично-допустимої дистанції D_d . Для точки межі області з координатою K_{iy} , отриманої за заданою координатою K_{jy} за допомогою виразу (4.11), знаходимо прирощення курсів суден щодо початкових значень $\Delta K_i = K_{iy} - K_{io}$ і $\Delta K_j = K_{jy} - K_{jo}$, за якими визначаємо прирощення координат Δx_1 , Δy_1 , Δx_2 і Δy_2 обох суден за час їх поворотів з урахуванням динамічної моделі їх обертового руху. Потім розраховуються прирощення відносних координат Δx_{ot} , Δy_{ot} і за допомогою виразу (4.1) обчислюється перше наближення $\Delta D_d^{(1)}$ значення шуканого прирощення дистанції ΔD_d . Потім отримане значення $\Delta D_d^{(1)}$ підставляємо в формулу (4.12) і отримуємо уточнене значення $K_{iy}^{(1)}$. Знаходимо прирощення координати $\Delta K_i^{(1)} = K_{iy}^{(1)} - K_{io}$, а потім за описаним алгоритмом знаходимо друге наближення прирощення $\Delta D_d^{(2)}$, тільки при розрахунку відносного курсу ухилення K_{oty}^* за формулою (4.2) замість гранично-допустимої дистанції D_d беремо

суму $D_d + \Delta D_d^{(1)}$. Зазначена процедура послідовних наближень проводиться до тих пір, поки різниця прирощень $\Delta D_d^{(n)} - \Delta D_d^{(n-1)}$ не опиниться рівною або менше заданої величини δD . Після цього для даної точки межі області S_{Dij} розраховується координата $K_{iy} = K_{iy}^{(n)}$, відповідна до гранично-допустимої дистанції $D_d + \Delta D_d^{(n)}$. Таким чином розраховуються всі точки межі області небезпечних курсів S_{Dij} .

Для розрахунку меж області S_{Dij} з урахуванням інерційності суден при повороті було розроблено комп'ютерну програму, яка реалізує алгоритм, представлений на рис. 4.3. У програмі розрахунок збільшення координат суден при повороті проводиться за допомогою першої моделі обертального руху. В алгоритмі показаний розрахунок координат окремої точки межі області S_{Dij} . У разі, коли швидкість першого судна менше швидкості другого судна, тобто $V_1 < V_2$, межі області небезпечних курсів S_{Dij} розраховуються тільки для тих курсів K_2 , для яких виконується нерівність:

$$\frac{V_2}{V_1} [\sin(K_2 - \alpha_{12} - \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{\Delta_{12} D_{12}})] \leq 1.$$

Якщо ж швидкість першого судна більше швидкості другого судна, тобто $V_1 > V_2$, то курс другого судна K_2 , як незалежної змінної, приймає значення з діапазону від 0 до 360 градусів. Для обох випадків $V_1 < V_2$ і $V_1 > V_2$ курс першого судна K_1 , як функція, розраховується за формулою (4.12).

В окремому випадку при рівності швидкостей обох суден $V_1 = V_2$ розрахунок курсу першого судна проводиться за допомогою залежності:

$$K_1 = \pi + 2[\alpha_{12} - \arcsin(\frac{D_d + \Delta D_d}{\Delta_{12} D_{12}})] - K_2.$$

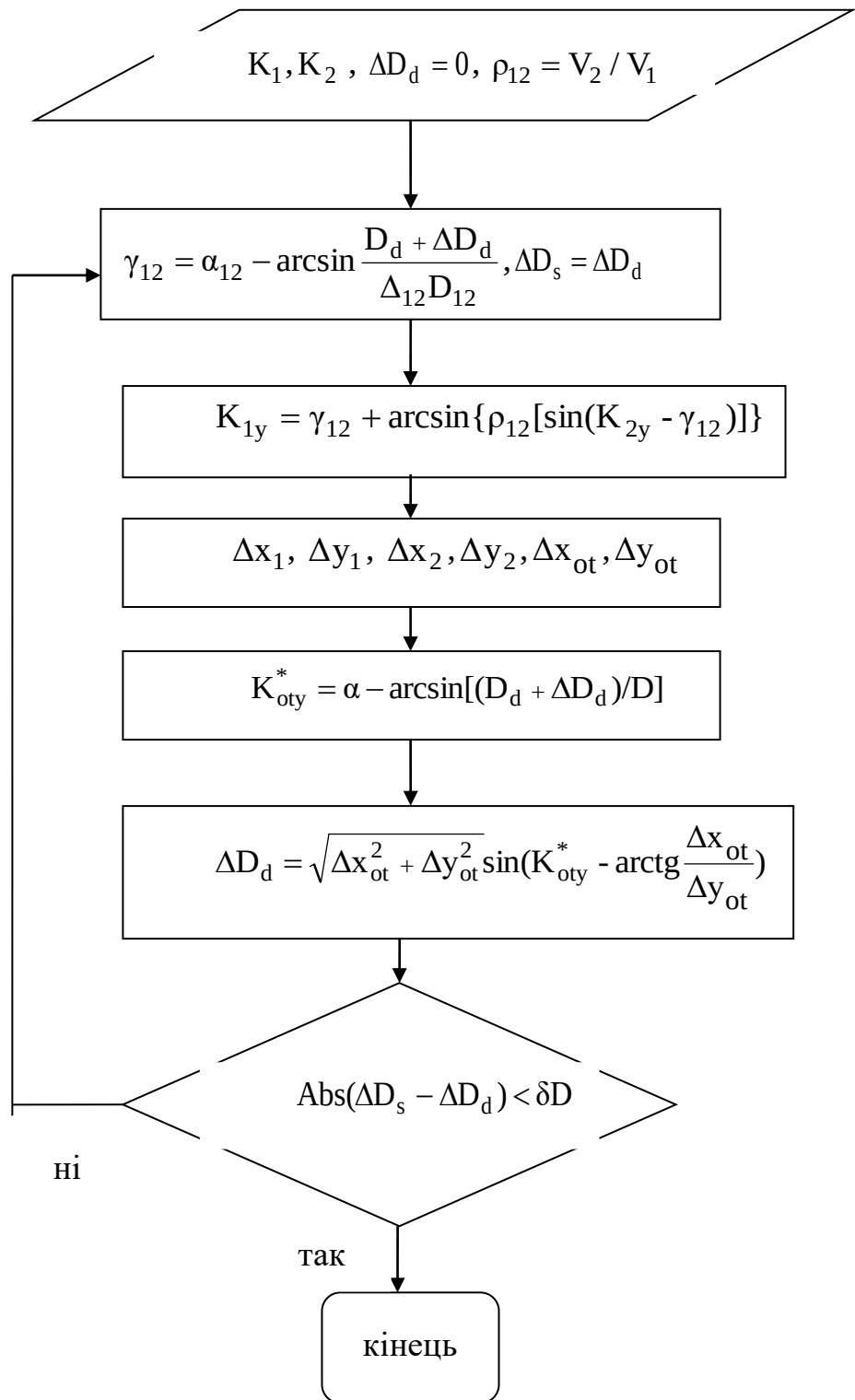


Рис. 4.3. Алгоритм розрахунку точки межі області S_{Dij}

За допомогою розробленої комп'ютерної програми для випадку $V_1 < V_2$ було згенеровано першу ситуацію небезпечного зближення суден з відносною позицією зближення $\alpha_{12} = 73^\circ$, $D_{12} = 3$ милі і параметрами руху суден $K_1 = 52^\circ$, $V_1 = 15$ вузлів, $K_2 = 280^\circ$, $V_2 = 20$ вузлів. Ситуацію небезпечного зближення показано на рис. 4.4.

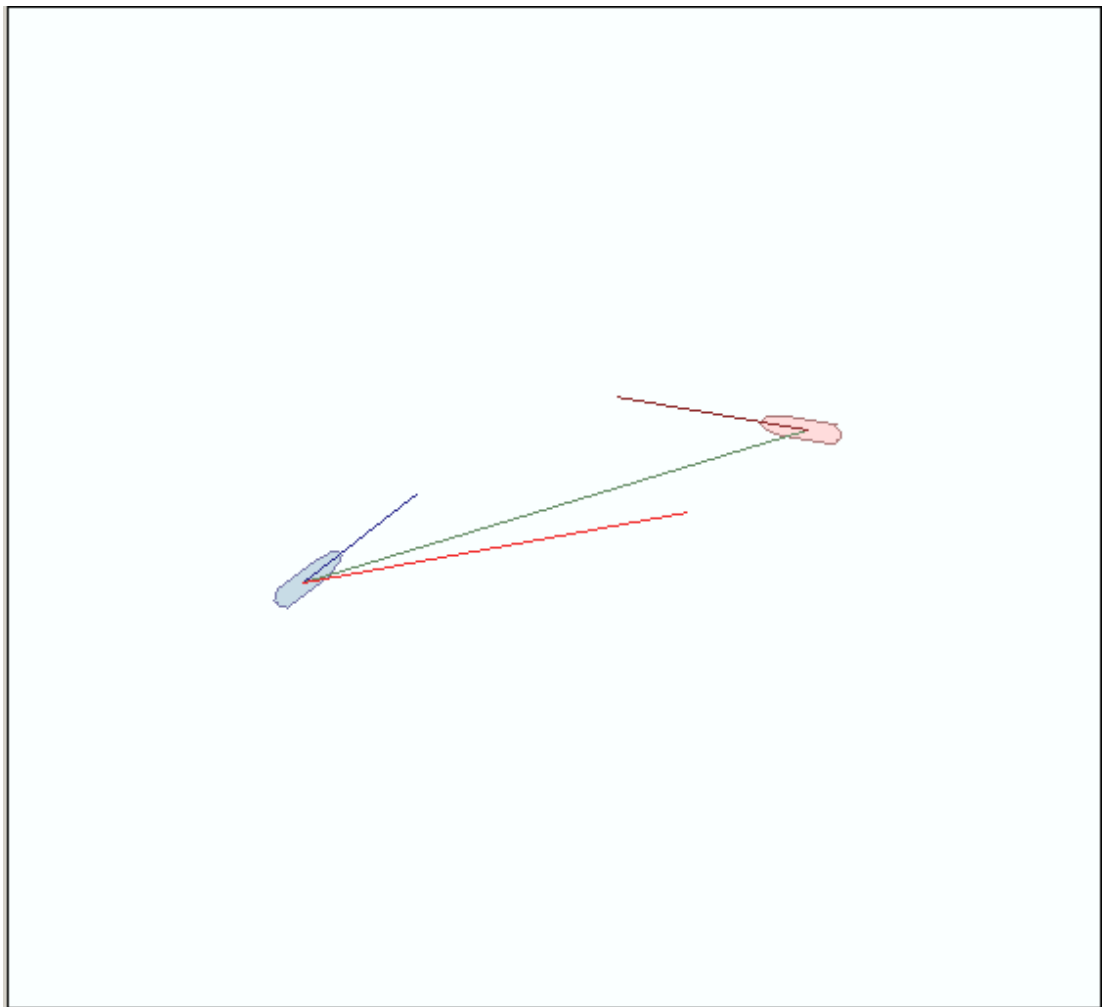


Рис. 4.4. Перша ситуація небезпечного зближення при $V_1 < V_2$

Для даної ситуації небезпечного зближення межі області небезпечних курсів S_{Dij} без урахування інерційності суден показані на рис. 4.5 червоним і зеленим кольорами, а межі області з урахуванням інерційності суден при повороті мають синій колір. Звертаємо увагу, що межі області без урахування інерційності знаходяться всередині меж області з урахуванням її.

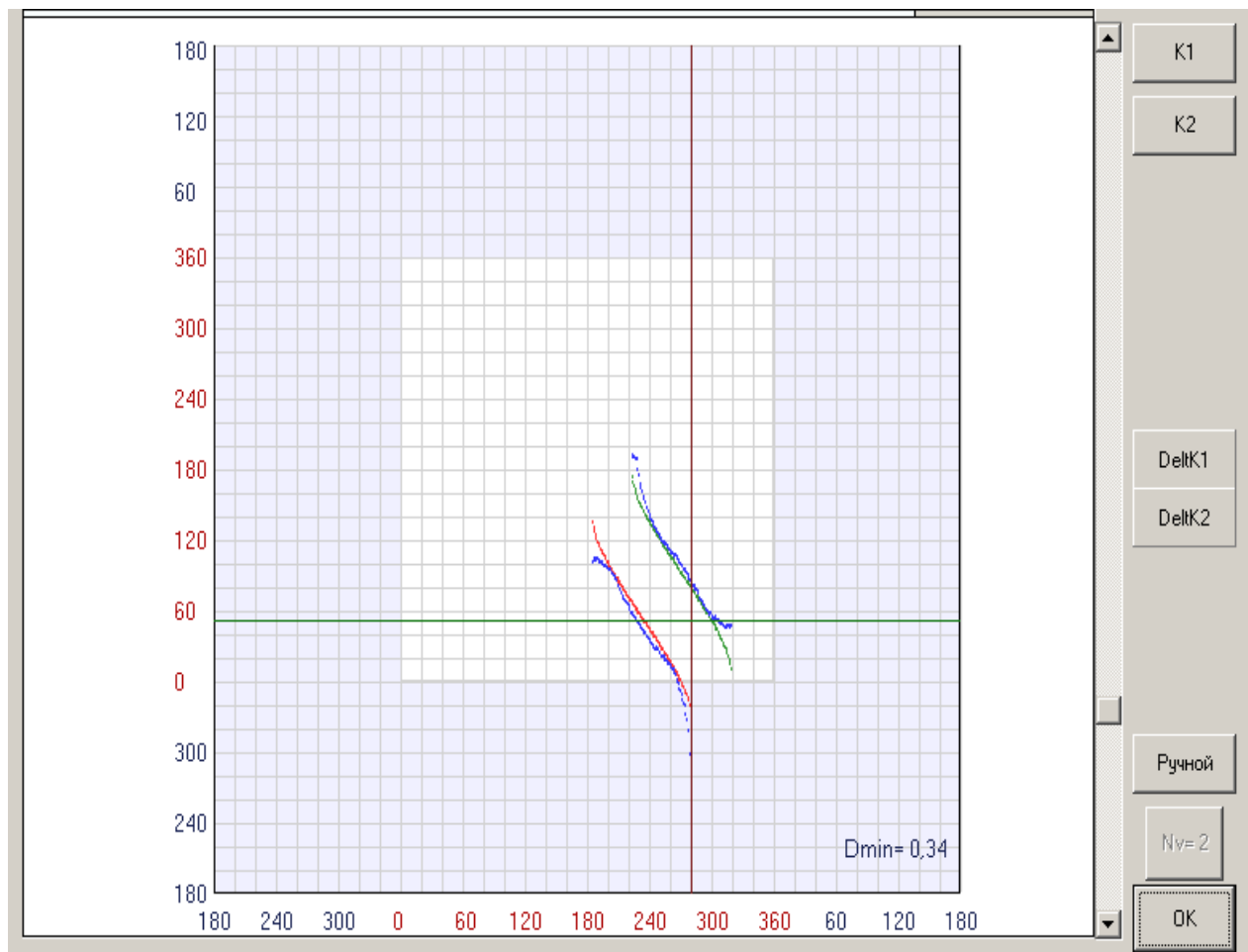


Рис. 4.5. Межі області S_{Dij} з урахуванням інерційності суден

На рис. 4.6 показано другу ситуація небезпечного зближення суден для випадку $V_1 < V_2$, яку було згенеровано комп'ютерною програмою і яка характеризується наступними параметрами: відносною позицією зближення $\alpha_{12} = 93^\circ$, $D_{12} = 2,5$ милі і параметрами руху суден $K_1 = 124^\circ$, $V_1 = 15$ вузлів,

$K_2=257^\circ$, $V_2=20$ вузлів. Дана ситуація небезпечного зближення характеризується таким же співвідношенням швидкостей суден, як і в першій ситуації небезпечного зближення, проте початкова дистанція між суднами на 0,5 милі менше попередньої ситуації. В обох ситуаціях величина гранично-допустимої дистанції зближення суден D_d обрано рівною 1 милі. Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення в ситуації, що розглядається дорівнює 0,17 милі, що значно менше величини D_d м.

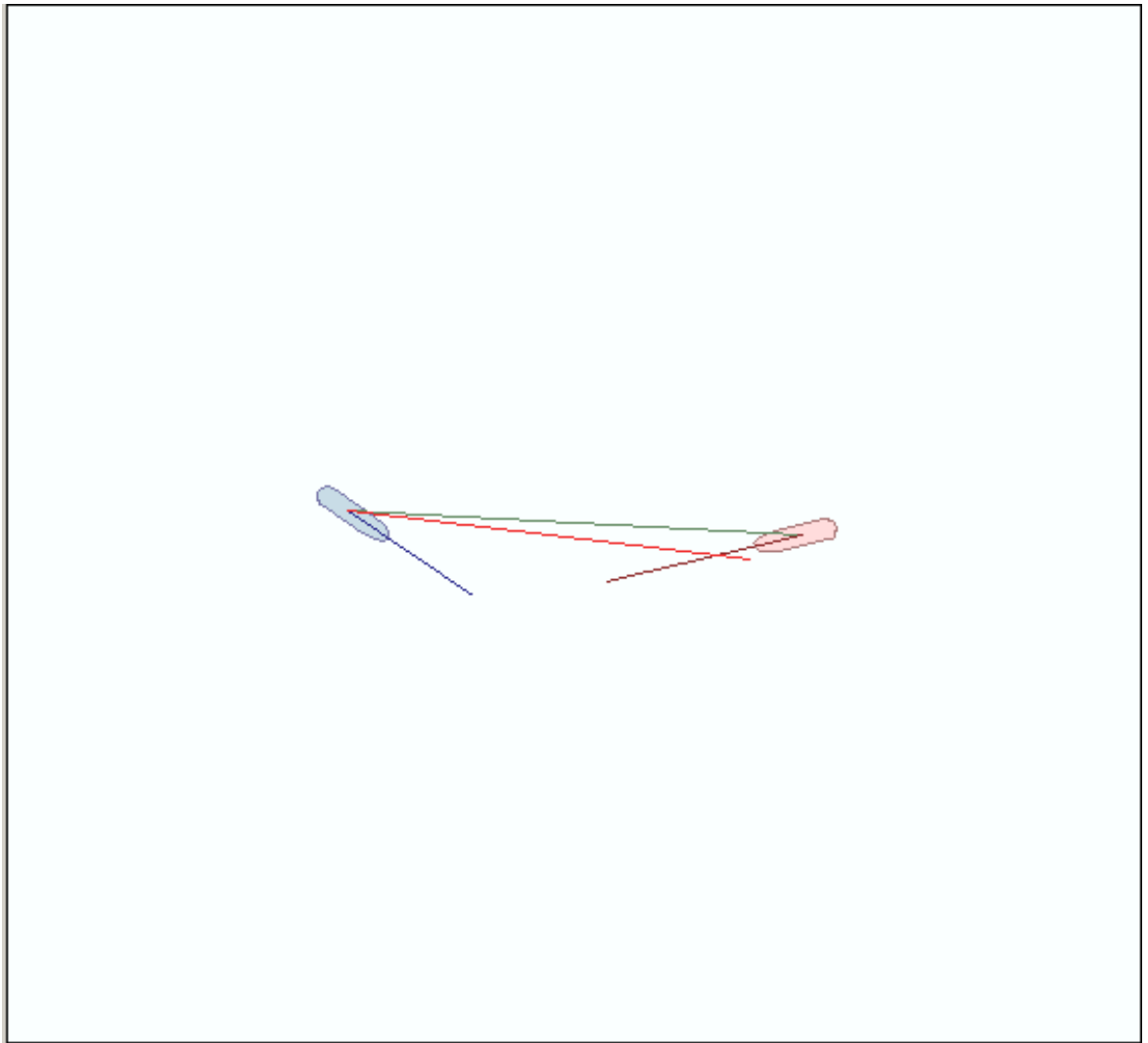


Рис. 4.6. Друга ситуація небезпечного зближення при $V_1 < V_2$

На наведеному рис. 4.6 крім лінії пеленга, що з'єднує позиції суден, з позиції першого судна проведено лінію відносного курсу руху, за положенням якої щодо лінії пеленга можна судити про небезпеку зближення суден. На рис. 4.6 положення лінії відносного курсу незначно відрізняється від напрямку лінії пеленга, що свідчить про невелике значення дистанції найкоротшого зближення. Для другої ситуації небезпечного зближення область небезпечних курсів S_{Dij} з урахуванням інерційності суден при повороті і без її врахування показано на рис. 4.7. Як і в першій ситуації небезпечного зближення, межі області небезпечних курсів без урахування інерційності суден знаходяться всередині меж області з її урахуванням.

Тому при виборі безпечного курсу ухилення слід користуватися зовнішньою межею синього кольору. Так безпечний курс ухилення першого судна при повороті вправо дорівнює 180° , а при повороті вліво - 40° . Цим курсам відповідають горизонтальні лінії, що проходять через межі області небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден в точках їх перетину з вертикальною лінією курсу другого судна $K_2=257^\circ$, що показано на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Межі області S_{Dij} при другій ситуації зближення

Для випадку $V_1 > V_2$ також були згенеровані дві ситуації небезпечного зближення. Перша ситуація характеризується наступними параметрами: відносною позицією зближення $\alpha_{12} = 74^\circ$, $D_{12} = 3,0$ милі і параметрами руху суден $K_1 = 45^\circ$, $V_1 = 20$ вузлів, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 10$ вузлів, причому $D_d = 1$ миля. Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення становить 0,12 милі. Перша ситуація небезпечного зближення при $V_1 > V_2$ відображена на рис. 4.8.

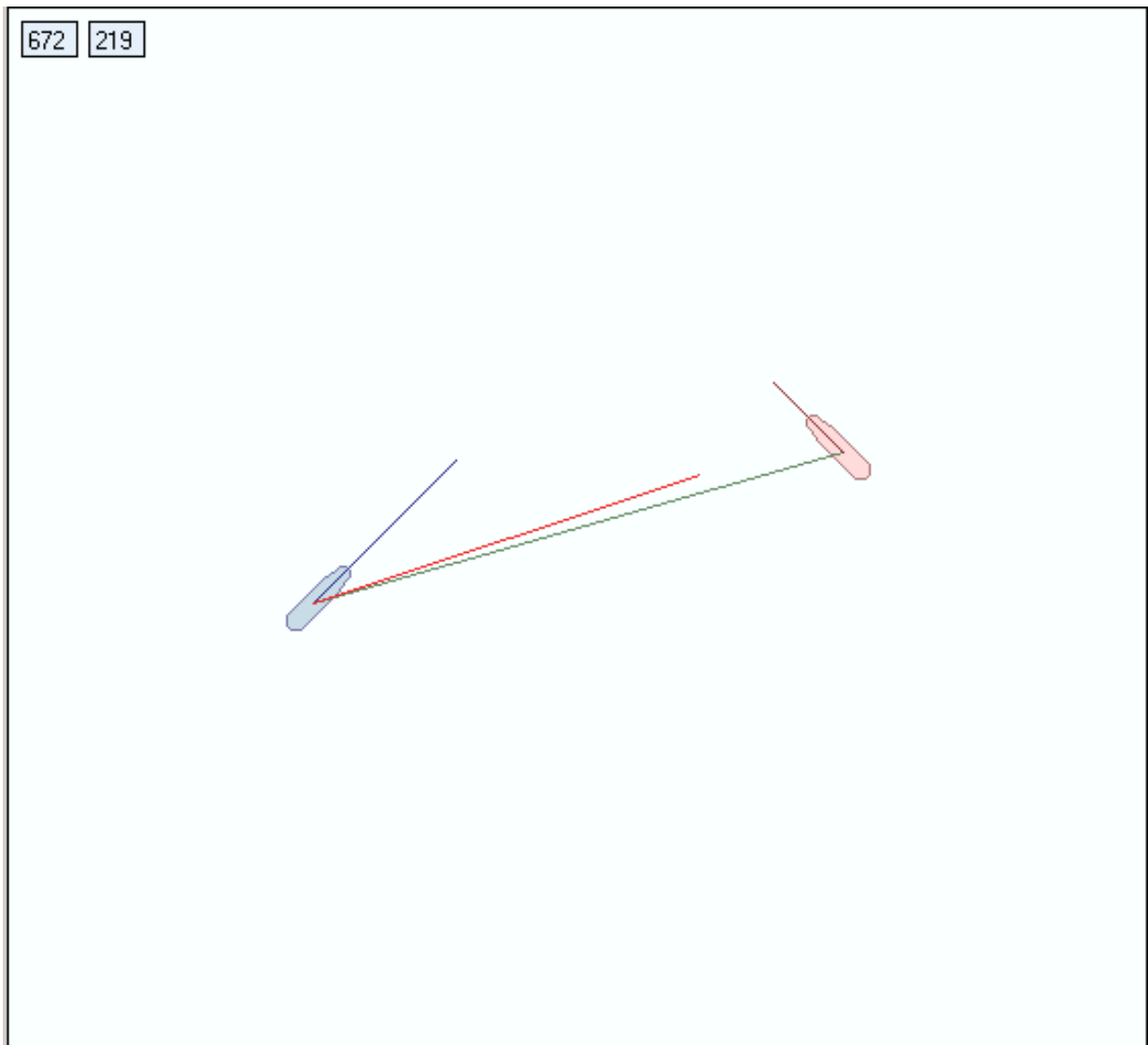


Рис. 4.8. Перша ситуація небезпечного зближення при $V_1 > V_2$

Для першої ситуації на рис. 4.9 показані межі області небезпечних курсів, причому її межі з урахуванням інерційності суден показані синім кольором.

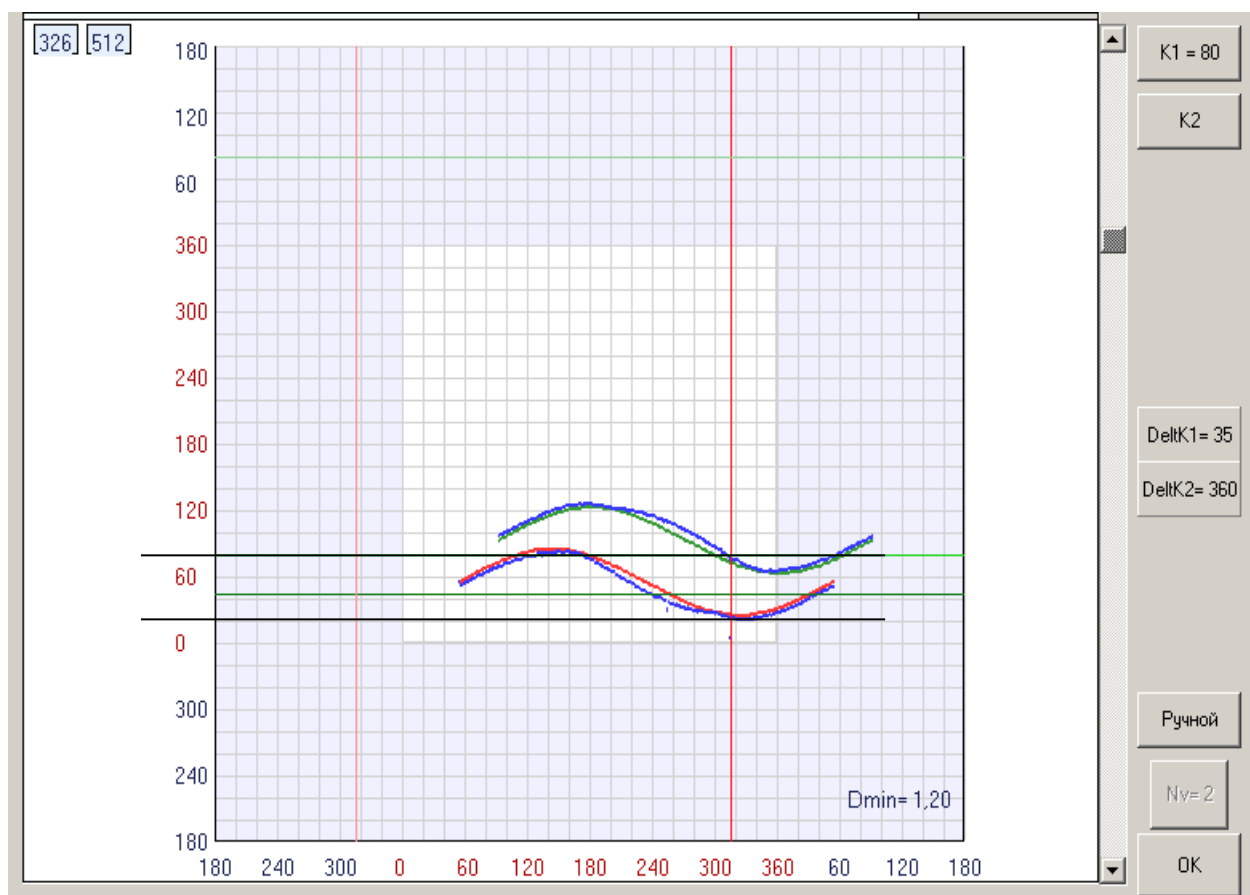


Рис. 4.9. Межі області S_{Dij} першій ситуації зближення при $V_1 > V_2$

З рисунку випливає, що тільки ухиленням першого судна при незмінних параметрах руху другого судна безпечними курсами при повороті вправо є курс 80° , а при повороті вліво - 22° . Обидва зазначених курси показано на рис. 4.9 горизонтальними чорними лініями, що проходять через межі області небезпечних курсів, які враховують інерційності суден при повороті.

Другу ситуацію небезпечного зближення суден для випадку $V_1 > V_2$ показано на рис. 4.10 було згенеровано комп'ютерною програмою і її параметрами є: відносна позиція зближення $\alpha_{12} = 158^\circ$, $D_{12} = 2,0$ милі і параметри руху обох суден $K_1 = 117^\circ$, $V_1 = 23$ вузла, $K_2 = 58^\circ$, $V_2 = 14$ вузлів, величина гранично-допустимої дистанції зближення суден D_d обрано рівною 1 милі.

Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення в розглядуваній ситуації дорівнює 0,16 милі, що менше величини D_d .

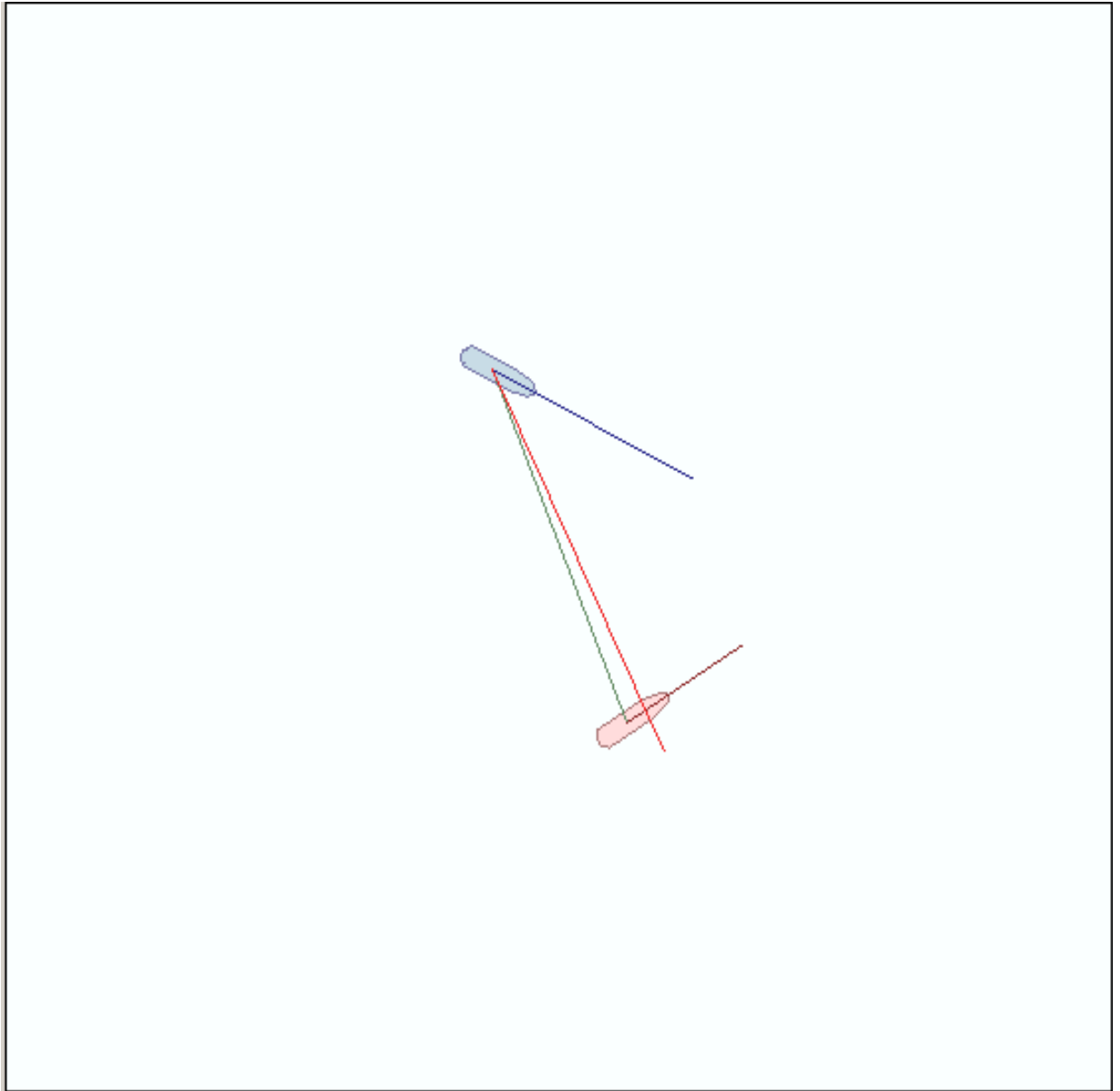


Рис. 4.10. Друга ситуація небезпечного зближення при $V_1 > V_2$

Межі області небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден і без нього представлені на рис. 4.11. У даній ситуації межі області небезпечних курсів при врахуванні інерційності суден значно відрізняються від меж без

врахування їх інерційності. Без врахування інерційності для безпечного розходження досить було б змінити курс другого судна вліво на значення $K_{2y}=321^\circ$, не змінюючи курсу першого судна. У цьому випадку відповідна вертикальна темна лінія проходить через червону нижню межу області небезпечних курсів, перетинаючись з горизонтальною лінією початкового курсу першого судна $K_1=117^\circ$. Однак нижня межа області небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден синього кольору проходить набагато нижче і для безпечного розходження необхідно ще й ухилення першого судна вліво на курс $= 84^\circ$ (нижня горизонтальна темна лінія). Таким чином, для безпечного розходження суден з урахуванням їх інерційності на допустимій дистанції $= 1$ миля суднам слід лягти на курси ухилення $= 84^\circ$ і $= 321^\circ$.

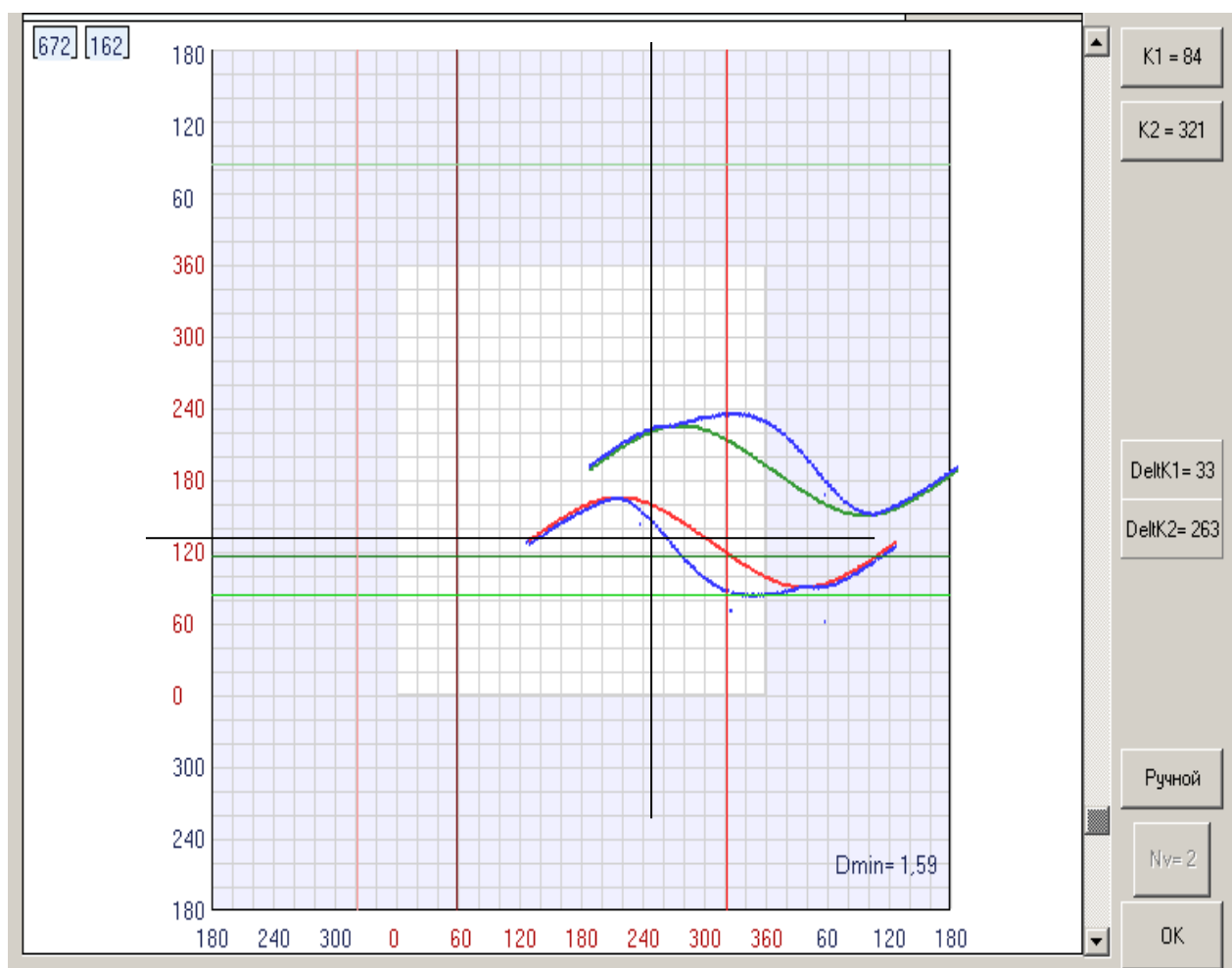


Рис. 4.11 . Межі області S_{Dij} другої ситуації зближення при $V_1 > V_2$

4.2. Врахування навігаційних небезпек при виборі маневру розходження за допомогою області небезпечних курсів суден

В роботі [1] показано, що навігаційні небезпеки, врахування яких необхідне при виборі безпечного маневру розходження, належать до одного з трьох наступних основних типів:

- точкові навігаційні небезпеки, розмірами яких можна знехтувати;
- розподілені лінійні навігаційні небезпеки, межа яких може бути описана прямою лінією (наприклад, ізобата, що має прямолінійний вигляд);
- складні розподілені навігаційні небезпеки, межа такої небезпеки має складну форму і описується нелінійними аналітичними залежностями.

Точкова навігаційна небезпека обмежується колом з радіусом, рівним граничній допустимій дистанції $\hat{l}_n$ найкоротшого зближення, центром якої є сама точкова навігаційна небезпека. Така окружність є межею точкової навігаційної небезпеки. Знайдемо аналітичний вираз для мінімальної дистанції $\min l_n$ між судном і точковою навігаційною ціллю, допускаючи, що задана початкова відносна позиція і судно прямує з незмінними параметрами руху. Поточна відносна позиція судна і цілі задана відносними координатами $\Delta\xi$ і $\Delta\eta$, які описуються наступними виразами (рис. 4.12):

$$\Delta\xi = \Delta\xi_n - \Delta\xi_t;$$

$$\Delta\eta = \Delta\eta_n - \Delta\eta_t,$$

де $\Delta\xi_n$ і $\Delta\eta_n$ - координати початкової позиції;

$\Delta\xi_t$ і $\Delta\eta_t$ - зміна початкових координат.

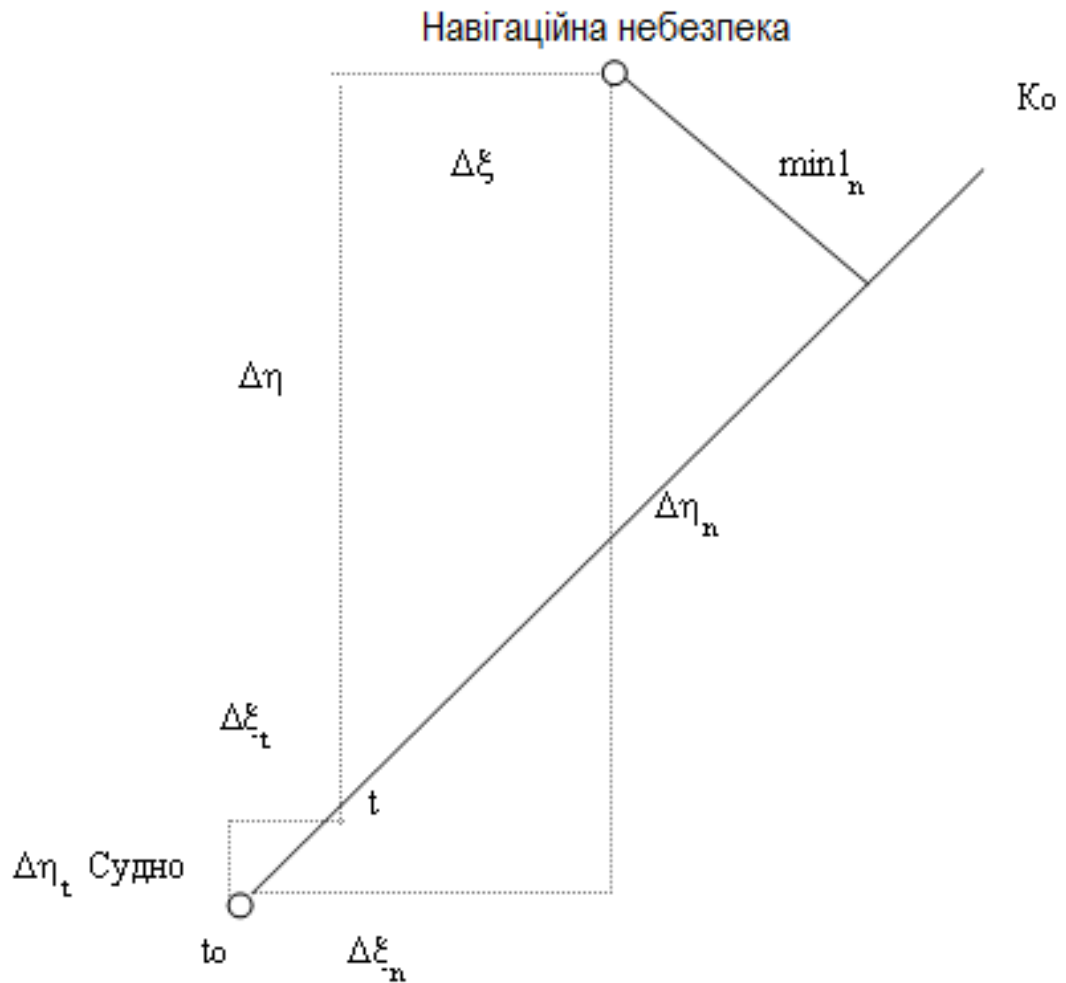


Рис. 4.12. Вивід виразу для мінімальної дистанції $min l_n$

Поточна дистанція до точкової навігаційної небезпеки l визначиться за відомою залежністю:

$$l = \sqrt{\Delta \xi^2 + \Delta \eta^2},$$

(4.13)

за допомогою якого можна знайти вираз для мінімального значення $min l_n$. Для цього слід знайти першу похідну дистанції l за часом $\frac{\partial l}{\partial t}$ і порівняти її до нуля. Диференціюючи вираз (4.13) за часом, отримаємо:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{\Delta \xi \Delta \dot{\xi} + \Delta \eta \Delta \dot{\eta}}{l} = 0, \text{ або}$$

$$\Delta \xi \Delta \dot{\xi} + \Delta \eta \Delta \dot{\eta} = 0.$$

(4.14)

З урахуванням незмінних параметрів руху судна K_o і V_o отримаємо:

$$\Delta \xi_t = V_o t \sin K_o, \quad \Delta \eta_t = V_o t \cos K_o,$$

$$\Delta \xi = \Delta \xi_n - V_o t \sin K_o, \quad \Delta \eta = \Delta \eta_n - V_o t \cos K_o,$$

$$\Delta \dot{\xi} = V_o \sin K_o, \quad \Delta \dot{\eta} = V_o \cos K_o.$$

Підставляємо отримані вирази в рівняння (4.14):

$$(\Delta \xi_n - V_o t_k \sin K_o) V_o \sin K_o + (\Delta \eta_n - V_o t_k \cos K_o) V_o \cos K_o = 0, \text{ звідки}$$

$$t_k = \frac{\Delta \xi_n \sin K_o + \Delta \eta_n \cos K_o}{V_o}, \text{ або } t_k = \frac{l_n \cos(K_o - \alpha_n)}{V_o},$$

оскільки

$$\Delta \xi_n = l_n \sin \alpha_n \text{ и } \Delta \eta_n = l_n \cos \alpha_n,$$

де l_n і α_n - відповідно початкова дистанція і пеленг до точкової навігаційної небезпеки. З урахуванням отриманого виразу для t_k прирощення відносних координат $\Delta \xi$ і $\Delta \eta$:

$$\Delta\xi(t_k) = \Delta\xi_n - l_n \sin K_o \cos(K_o - \alpha_n),$$

$$\Delta\eta(t_k) = \Delta\eta_n - l_n \cos K_o \cos(K_o - \alpha_n).$$

Отримані вирази для $\Delta\xi(t_k)$ і $\Delta\eta(t_k)$ підставляємо в (3.13) і знаходимо формулу для розрахунку $\min l_n$:

$$\min l_n = \sqrt{\Delta\xi(t_k)^2 + \Delta\eta(t_k)^2},$$

або після перетворень

$$\min l_n = l_n \sqrt{1 - \cos^2(K_o - \alpha_n)}.$$

Остаточно вираз для $\min l_n$ набуває вигляду:

$$\min l_n = l_n \sin(K_o - \alpha_n)$$

Умова безпечного проходження точкової небезпеки передбачає перевагу значення дистанції найкоротшого зближення $\min l_n$ над значенням гранично-допустимої дистанції найкоротшого зближення $\hat{l}_n$, що аналітично виражається в такий спосіб:

$$\text{Abs}[l_n \sin(K_y - \alpha_n)] \geq \hat{l}_n. \quad (4.15)$$

Вираз (4.15) дозволяє знайти граничні безпечні курси ухилення судна з умови $\min l_n = \hat{l}_n$, тому:

$$\text{Abs}[l_n \sin(K_y - \alpha_n)] \geq \hat{l}_n,$$

звідки граничні курси ухилення судна K_{y*} і K_y^* :

$$K_{y*} = \alpha_n - \arcsin \frac{\hat{l}_n}{l_n};$$

$$K_y^* = \alpha_n + \arcsin \frac{\hat{l}_n}{l_n}.$$

Тому безпечними курсами ухилення K_y є ті, які не належать до підмножини $[K_{y*}, K_y^*]$, тобто $K_y \notin [K_{y*}, K_y^*]$, як показано на рис. 4.13.

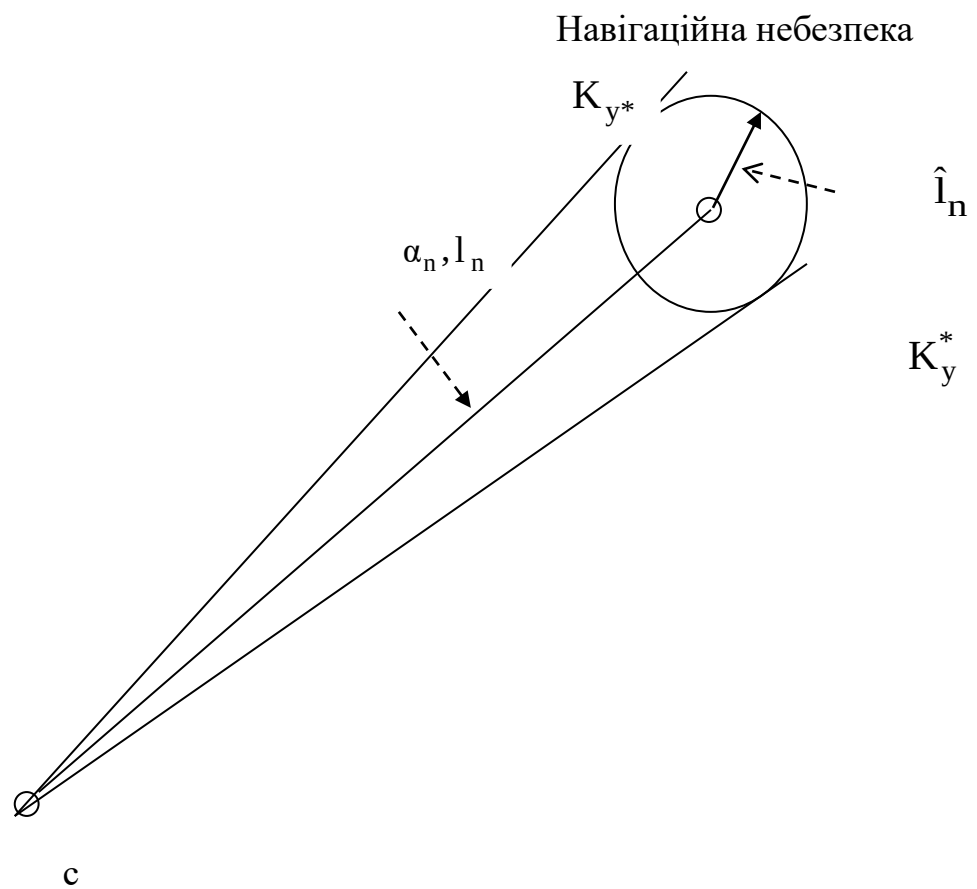


Рис. 4.13. Граничні безпечні курси ухилення K_{y*} і K_y^*

Як приклад розглянуто наступну ситуацію небезпечного зближення суден, яка характеризується параметрами: відносна позиція зближення

$\alpha_{12} = 74^\circ$, $D_{12} = 3,0$ милі і параметрами руху суден $K_1 = 45^\circ$, $V_1 = 15$ вузлів, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 15$ вузлів, причому $D_d = 1,0$ миля. Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення становить $0,8$ милі. Дану ситуацію небезпечного зближення при $V_1 = V_2$ показано на рис. 4.14. Попереду за курсом руху суден розташовано точкову навігаційну небезпеку, положення якої відносно першого судна характеризується пеленгом $\alpha_1 = 40^\circ$ і дистанцією $D_1 = 2,6$ милі, а відносно другого судна $\alpha_2 = 313^\circ$ і $D_2 = 1,63$ милі. За положенням точкової навігаційної небезпеки відносно обох суден і $\hat{I}_n = 0,25$ були розраховані граничні безпечні курси ухилення. В результаті розрахунку для першого судна були отримані наступні граничні безпечні курси $K_{1y*} = 15^\circ$ і $K_{1y}^* = 65^\circ$, які показано на рис. 4.14 від лівого першого судна пунктирними лініями. Для другого правого судна отримали наступні граничні безпечні курси $K_{2y*} = 296^\circ$ і $K_{2y}^* = 330^\circ$. Отримані граничні курси характеризують для кожного із суден підмножину неприпустимих курсів ухилення.

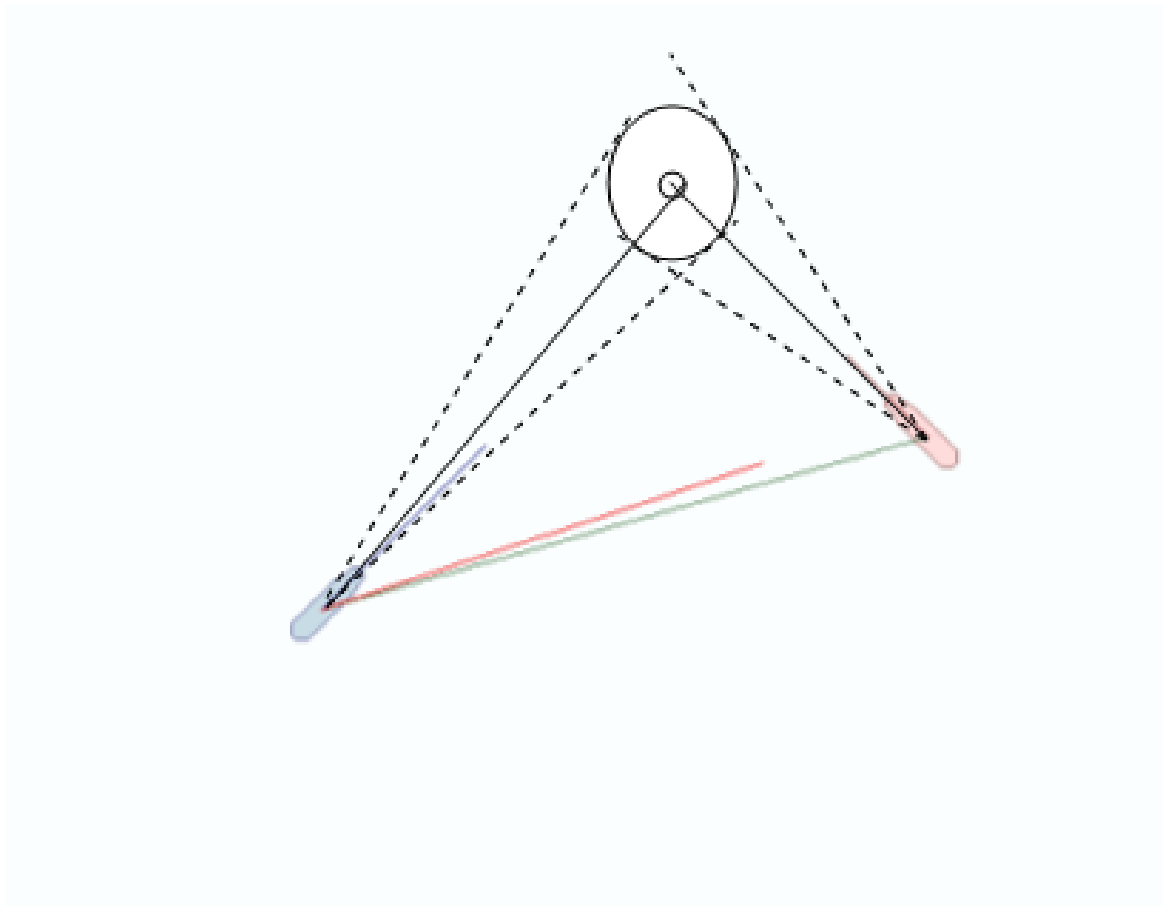


Рис. 4.14. Ситуація небезпечного зближення при наявності точкової небезпеки

Для розглянутої ситуації небезпечного зближення на рис. 4.15 показано область небезпечних курсів суден S_{Dij} , специфічну форму якої викликано рівністю швидкостей суден що зближаються. На розширену площину курсів суден пунктирними лініями нанесені граничні безпечні курси ухилення. При виборі курсів ухилення суден забороняється використовувати курси які знаходяться між відповідними граничними значеннями.



Рис. 4.15. Область небезпечних курсів S_{Dij} з урахуванням точкової небезпеки

У розглянутому прикладі спільний безпечний маневр розходження відповідає точці верхньої межі області S_{Dij} , в якій перетинаються граничні безпечні курси $K_{1y}^* = 65^\circ$ і $K_{2y}^* = 296^\circ$, а їх значення відповідають курсам ухилення, при яких судна безпечно розходяться не підлягаючи ризику з боку навігаційної небезпеки.

До другого типу навігаційних небезпек, як зазначалося вище, належать розподілені лінійні небезпеки, які в першому наближенні геометрично можуть бути представлені прямою лінією. Тому для формалізації навігаційного обмеження цього типу навігаційних небезпек необхідно знайти аналітичний вираз, що описує межу навігаційної небезпеки. Для цього слід провести обґрунтування вибору напрямку межі навігаційної небезпеки,

враховуючи, що її межа розділяє район плавання судна на область безпечного в навігаційному відношенні плавання і аварійну область. Напрямок лінійної межі навігаційної небезпеки вибрано таким чином, щоб безпечна область завжди перебувала справа від напрямку межі навігаційної небезпеки. Так, якщо межа навігаційної небезпеки розташована горизонтально і безпечна область знаходиться під межею, то її напрямок дорівнює куту $\beta = 90^\circ$. Якщо ж безпечна область знаходиться над межею навігаційної небезпеки, то $\beta = 270^\circ$, як показано на рис 4.16. Дане правило вибору напрямків лінійної межі навігаційної небезпеки дозволяє отримувати позитивне значення найкоротшої дистанції до межі $\min l_n$, если судно находится в безопасной области, и отрицательное значение, - в противном случае.

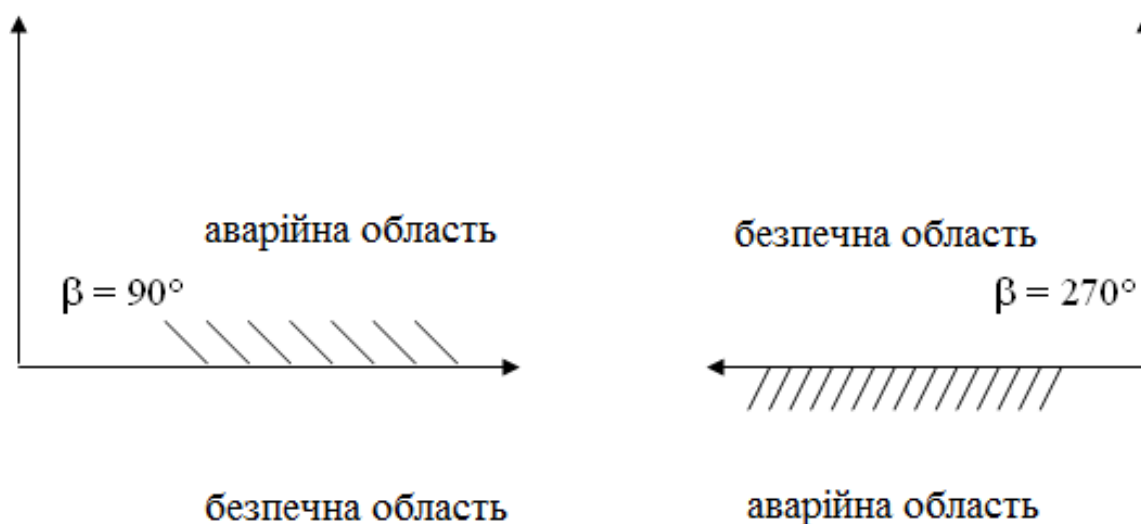


Рис. 4.16. Визначення напрямку лінійної межі небезпеки

Розглянемо аналітичний вираз для навігаційних обмежень в разі розподіленої лінійної навігаційної небезпеки. Початкове обмеження має вигляд $\min l_n \geq \hat{l}_n$, в якому $\hat{l}_n$ - гранична допустима дистанція між судном і межею навігаційної небезпеки. З рис. 4.17 випливає, що $\min l_n$ визначається наступним виразом:

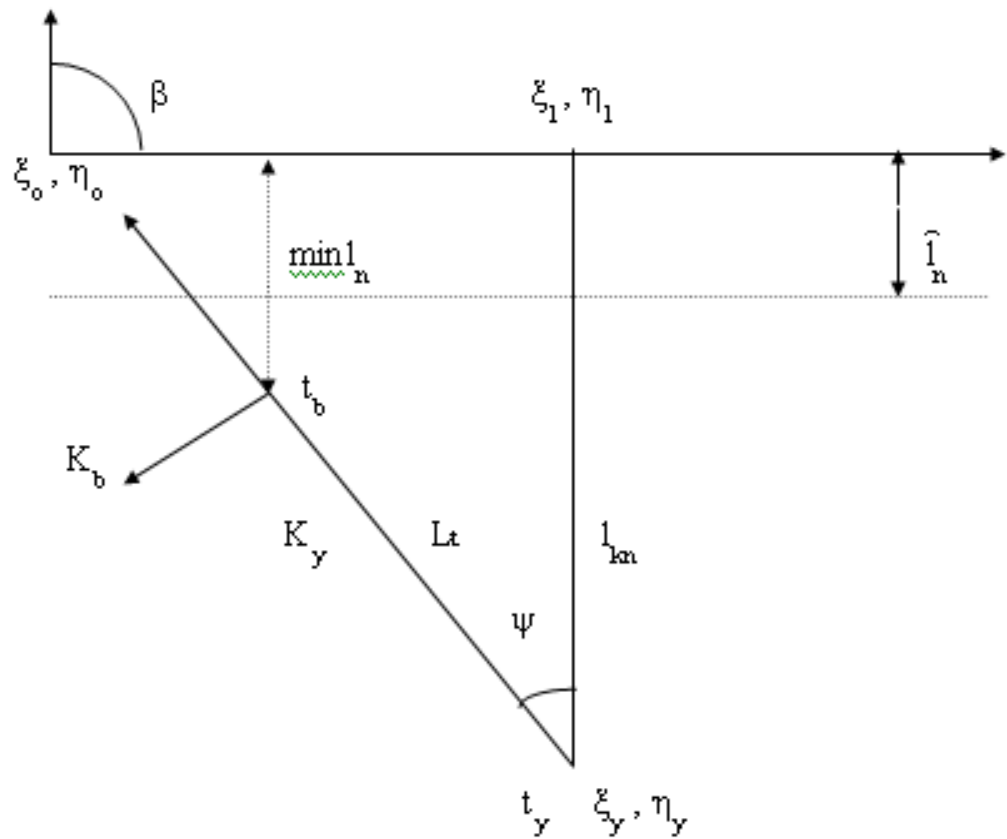


Рис. 4.17. До виводу виразу для $\min l_n$.

$$\min l_n = l_{kn} - L_t \cos \psi.$$

Кут ψ аналітично виражається в такий спосіб:

$$\psi = 2\pi - K_y + \beta - \frac{\pi}{2}; \quad \psi = \beta - K_y + \frac{3\pi}{2}.$$

Тому

$$\cos \psi = \cos\left(\beta - K_y + \frac{3\pi}{2}\right) = \sin(\beta - K_y).$$

З рис. 4.17 випливає $L_t = V_o(t_b - t_y)$, де t_y і t_b - відповідно моменти часу початку ухилення судна і початку повороту в бік програмної траєкторії руху. Отже, $\min l_n$ є функцією інтервалу часу $(t_b - t_y)$ і визначається з наступної аналітичної залежності:

$$\min l_n = l_{kn} - V_o(t_b - t_y) \sin(\beta - K_y), \quad (4.16)$$

де l_{kn} - нормальна відстань до межі навігаційної небезпеки в момент часу t_y .

Для пошуку виразу розрахунку величини l_{kn} координати судна на момент часу початку ухилення t_y позначимо через ξ_y, η_y , координати точки початку межі лінійної навігаційної небезпеки, - через ξ_o, η_o , а координати точки перетину нормалі з межею лінійної небезпеки позначені через ξ_1, η_1 . Вводимо позначення $\Delta\xi_1 = \xi_1 - \xi_y, \Delta\eta_1 = \eta_1 - \eta_y$ і записуємо вираз для l_{kn} :

$$l_{kn} = (\Delta\xi_1^2 + \Delta\eta_1^2)^{1/2}.$$

Координати ξ_y, η_y і ξ_o, η_o відомі, проте координати точки перетину нормалі з межею лінійної навігаційної небезпеки ξ_1, η_1 необхідно визначити. Звертаємо увагу, що точка з координатами ξ_1, η_1 належить одночасно межі навігаційної небезпеки і нормалі до неї. Тому слід знайти рівняння межі лінійної навігаційної небезпеки і рівняння нормалі до неї, що проходять через

точку з координатами ξ_1, η_1 . Рівняння межі лінійної навігаційної небезпеки можна записати, як рівняння прямої лінії, що проходить через дві точки з відомим кутовим коефіцієнтом, тобто:

$$(\eta_1 - \eta_o) \sin \beta = (\xi_1 - \xi_o) \cos \beta.$$

У свою чергу, рівняння нормалі до кордону навігаційної небезпеки записуємо, як рівняння нормалі до прямої з відомим кутовим коефіцієнтом, яка проходить через точку з координатами ξ_y, η_y , тобто:

$$(\eta_1 - \eta_y) = -(\xi_1 - \xi_y) \operatorname{tg} \beta.$$

Невідомі координати ξ_1 і η_1 можна знайти з системи лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} (\eta_1 - \eta_o) \sin \beta = (\xi_1 - \xi_o) \cos \beta \\ (\eta_1 - \eta_y) = -(\xi_1 - \xi_y) \operatorname{tg} \beta. \end{cases}$$

(4.17)

Перетворимо перше рівняння наведеної системи, додавши і віднявши в дужках величину ξ_y в правій частині рівняння і η_y - в лівій. З огляду на це після перетворень отримаємо:

$$\Delta \eta_1 \sin \beta - \Delta \xi_1 \cos \beta = (\eta_y - \eta_o) \sin \beta - (\xi_y - \xi_o) \cos \beta.$$

Остання система (4.17) записується таким чином:

$$\begin{cases} \Delta\eta_1 \sin\beta - \Delta\xi_1 \cos\beta = (\eta_y - \eta_o) \sin\beta - (\xi_y - \xi_o) \cos\beta \\ \Delta\eta_1 \cos\beta + \Delta\xi_1 \sin\beta = 0 \end{cases},$$

звідки нескладно отримати вирази для $\Delta\xi_1$ і $\Delta\eta_1$, які мають такий вигляд:

$$\Delta\xi_1 = -C \cos\beta, \quad \Delta\eta_1 = C \sin\beta, \quad \text{где } C = (\eta_y - \eta_o) \sin\beta - (\xi_y - \xi_o) \cos\beta$$

$$\text{Отже, } l_{kn} = (\Delta\xi_1^2 + \Delta\eta_1^2)^{1/2} = (C^2 \cos^2\beta + C^2 \sin^2\beta)^{1/2} = C, \text{ або}$$

$$l_{kn} = (\eta_y - \eta_o) \sin\beta - (\xi_y - \xi_o) \cos\beta.$$

З урахуванням (4.16) вираз $\min l_n$ набирає вигляду:

$$\min l_n = (\eta_y - \eta_o) \sin\beta - (\xi_y - \xi_o) \cos\beta - V_o(t_b - t_y) \sin(\beta - K_y),$$

а формальне вираження для навігаційного обмеження в разі лінійної розподіленої навігаційної небезпеки записується в такий спосіб:

$$(\eta_y - \eta_o) \sin\beta - (\xi_y - \xi_o) \cos\beta - V_o(t_b - t_y) \sin(\beta - K_y) \geq \hat{l}_n. \quad (4.18)$$

Координати початку ухилення судна ξ_y , η_y залежать від t_y тому величина дистанції найкоротшого зближення $\min l_n$ судна з межею лінійної розподіленої навігаційної небезпеки залежить від обраного курсу ухилення

K_y , моменту часу початку ухилення t_y і моменту часу початку повороту до заданої траєкторії t_b . За інших рівних умов, дистанція найкоротшого зближення $\min l_n$ зменшується з ростом моментів часу t_y і t_b . Аналогічно, чим ближче різниця $\beta - K_y$ до величини $\pi/2$, тим менше, при інших рівних умовах, буде величина дистанції найкоротшого зближення $\min l_n$ судна з межею лінійної розподіленої навігаційної небезпеки. Звертаємо увагу на те, що отримана умова (4.18) характеризує можливість судна, яке слідує курсом K_y , який веде до лінійної навігаційної небезпеки, встигнути розійтися з другим судном і повернути до програмної траєкторії руху перш, ніж досягти навігаційної небезпеки. Такий маневр ухилення досить ризикований. Тому безпечні курси ухилення повинні виключати рух судна на навігаційну безпеку з урахуванням гранично-допустимої дистанції $\hat{l}_n$, як показано на рис. 4.18.

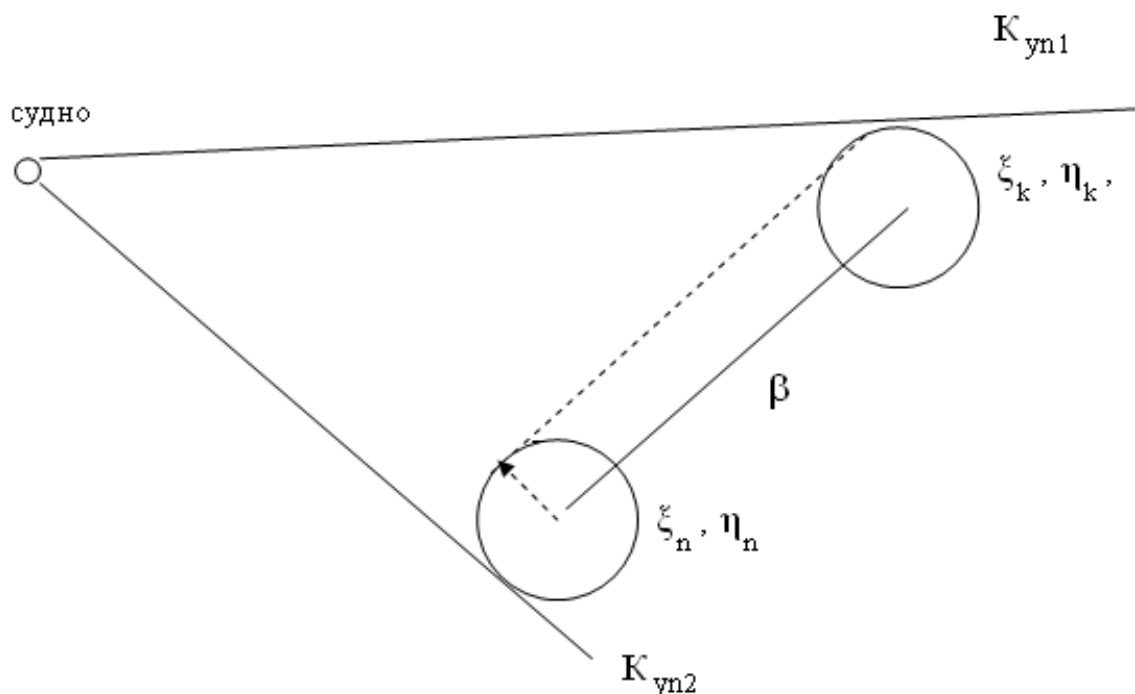


Рис. 4.18. Граничні курси ухилення K_{yn1} і K_{yn2} при лінійній небезпеці

Граничними курсами ухилення K_{yn1} і K_{yn2} є дотичні до кіл радіуса $\hat{l}_n$, центри яких знаходяться в кінцевих точках розподіленої лінійної навігаційної небезпеки. Тому граничні безпечні курси K_{yn1} (нижня межа) і K_{yn2} (верхня межа) визначаються виразами:

$$K_{yn1} = \alpha_1 - \arcsin \frac{\hat{l}_n}{D_1};$$

$$K_{yn2} = \alpha_2 - \arcsin \frac{\hat{l}_n}{D_2},$$

де α_1 і D_1 - пеленг і дистанція на кінцеву точку ξ_k і η_k лінійної навігаційної небезпеки;

α_2 і D_2 - пеленг і дистанція на початкову точку ξ_n і η_n лінійної навігаційної небезпеки.

Очевидно, при виборі курсу ухилення судна при небезпечному зближенні з ціллю для врахування лінійної навігаційної небезпеки необхідно уникати курсів ухилення $K_y \notin [K_{yn1}, K_{yn2}]$.

Як приклад небезпечного зближення суден при наявності заважаючої розподіленої лінійної навігаційної небезпеки і вибору в такій ситуації безпечного маневру розходження зміною курсу комп'ютерною програмою було згенеровано наступну ситуацію небезпечного зближення з параметрами: відносно положення суден $\alpha_{12} = 54^\circ$, $D_{12} = 2,5$ милі і параметрами руху суден $K_1 = 12^\circ$, $V_1 = 15$ вузлов, $K_2 = 268^\circ$, $V_2 = 20$ вузлів, причому $D_d = 1,0$ миля. Прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення становить 0,1 милі. Дана ситуація небезпечного зближення при $V_1 < V_2$ показана на рис. 4.19. Попереду у напрямку руху суден розташована розподілена лінійна навігаційна небезпека, положення якої щодо першого судна характеризується

пеленгом $\alpha_{1n} = 325^\circ$ і дистанцією $D_{1n} = 2,0$ милі на її початкову точку і пеленгом $\alpha_{1k} = 0^\circ$ і дистанцією $D_{1k} = 2,4$ милі на її кінцеву точку, а відносно другого судна $\alpha_{2n} = 270^\circ$, $D_{2n} = 3,1$ милі, $\alpha_{2k} = 300^\circ$, $D_{2k} = 2,45$ милі. За положенням країв розподіленої лінійної навігаційної небезпеки відносно обох суден і $\hat{l}_n = 0,25$ були розраховані граничні безпечні курси ухилення. В результаті розрахунку для першого судна були отримані наступні граничні безпечні курси $K_{1y*} = 320^\circ$ і $K_{1y}^* = 9^\circ$, які показані на рис. 4.19 від лівого першого судна пунктирними лініями. Для другого правого судна були отримані наступні граничні безпечні курси $K_{2y*} = 263^\circ$ і $K_{2y}^* = 310^\circ$. Отримані граничні курси характеризують для кожного із суден підмножину неприпустимих курсів ухилення.

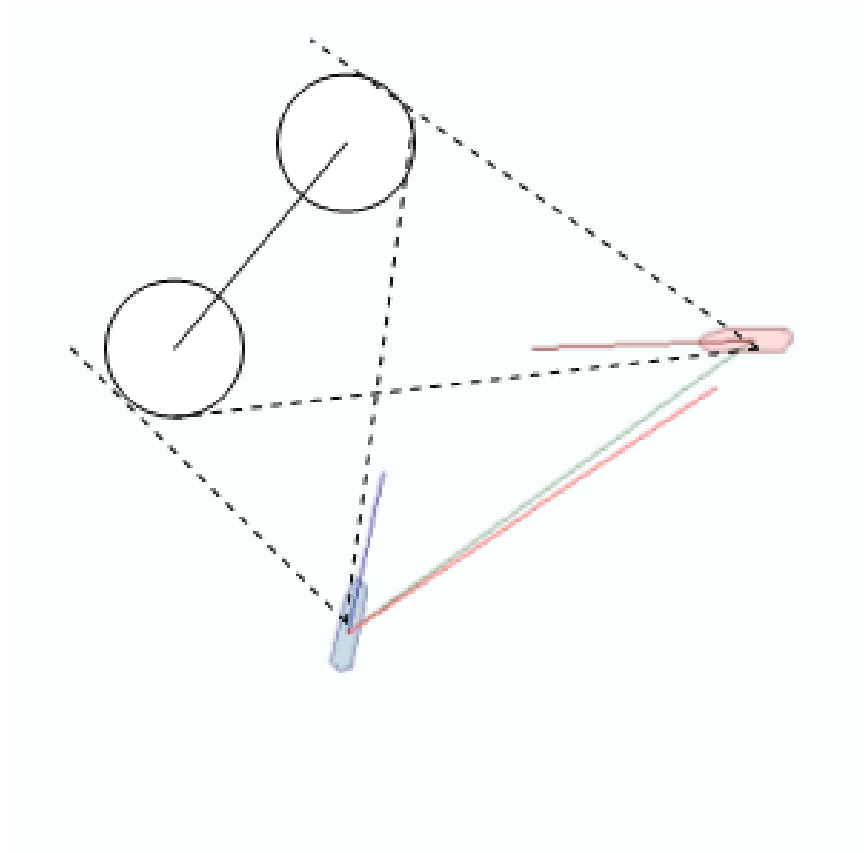


Рис. 4.19. Ситуація зближення при наявності лінійної небезпеки

Для даної ситуації небезпечного зближення на рис. 4.20 показана область небезпечних курсів суден S_{Dij} . На розширену площину курсів суден пунктирними лініями нанесені граничні безпечні курси ухилення, між якими забороняється використовувати курси ухилення в процесі вибору маневру безпечного їх розходження. В даному прикладі для вибору спільного безпечного маневру розходження слід вибрати точку нижньої межі області S_{Dij} , яка перетинається граничним безпечним курсом $K_{1y}^* = 9^\circ$, при цьому другому судну слід ухилитися курсом $K_{2y} = 230^\circ$. При цих курсах ухилення судна безпечно розходяться без загрози посадки на мілину.



Рис. 4.20. Область небезпечних курсів S_{Dij} з урахуванням лінійної небезпеки

Коли межа навігаційної розподіленої небезпеки не може бути в першому наближенні описана за допомогою лінійної залежності, то такий тип навігаційної небезпеки відноситься до складної розподіленої навігаційної небезпеки. При цьому можна запропонувати різні способи аналітичного опису такого типу навігаційних небезпек в залежності від методу опису їх межі. Зокрема, широко відомим є опис кривих за допомогою сплайнів або поліномів. Однак такі описи ускладнюють формалізацію навігаційних обмежень, які повинні містити в явному вигляді вираз для пошуку дистанції найкоротшого зближення судна з межею навігаційної небезпеки. Для отримання виразу, що дозволяє визначити величину дистанції найкоротшого зближення оперуючого судна з межею навігаційної небезпеки, доцільно межу складної розподіленої навігаційної небезпеки уявити у вигляді кусково-лінійної апроксимації (рис. 4.21), тобто містить ряд прямолінійних ділянок з координатами точок зламу ξ_{ni} , η_{ni} , через які вони проходять, і напрямками β_i . В цьому випадку в залежності від ступеня точності апроксимації довільна межа навігаційної небезпеки представляється кінцевим числом лінійних ділянок ($r_1 \div r_4$ на наведеному рисунку), кожен з яких можна розглядати як лінійну навігаційну розподілену небезпеку, опис якої детально наводилося вище. Відзначимо, що вибір конкретної ділянки лінійної апроксимації залежить від значення передбачуваного курсу ухилення K_y оперуючого судна.

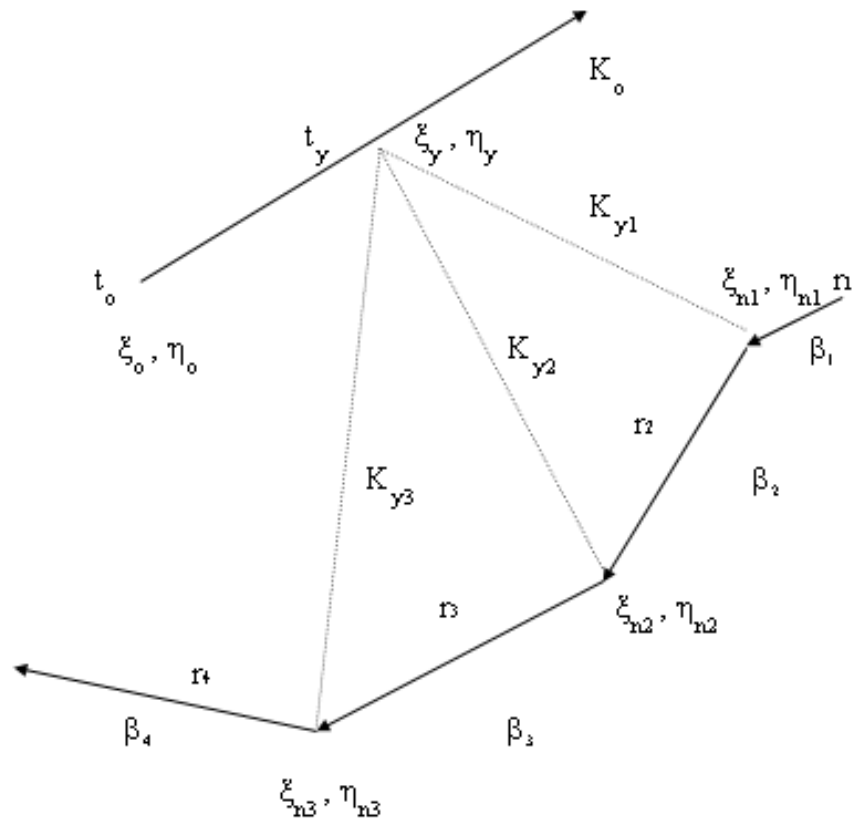


Рис. 4.21. Складна розподілена навігаційна небезпека

Зазначений підхід до опису складної розподіленої навігаційної небезпеки є досить громіздким, хоча і коректним з позицій теоретичного підходу. Однак для розглянутого способу вибору безпечного маневру розходження зміною курсів суден, яке визначається за допомогою області небезпечних курсів, можливий більш спрощений опис складної розподіленої навігаційної небезпеки, сенс якого полягає в наступному.

Складну розподілену навігаційну небезпеку будемо характеризувати координатами її центру і радіусом R_n , рівним максимальній відстані від центру до межі. Причому її положення відносно судна визначається пеленгом α_n на її центр і дистанцією D_n до нього, а небезпеку зближення - гранично-допустимою дистанцією $\hat{D}_n$.

У разі небезпечного зближення судна з ціллю при наявності розподіленої навігаційної небезпеки граничні значення курсів ухилення $K_{yn}^{(p)}$ і $K_{yn}^{(s)}$ знаходяться в такий спосіб (рис. 4.22):

$$K_{yn}^{(p)} = \alpha_n - \arcsin \frac{R_n + \hat{D}_n}{D_n},$$

$$K_{yn}^{(s)} = \alpha_n + \arcsin \frac{R_n + \hat{D}_n}{D_n}.$$

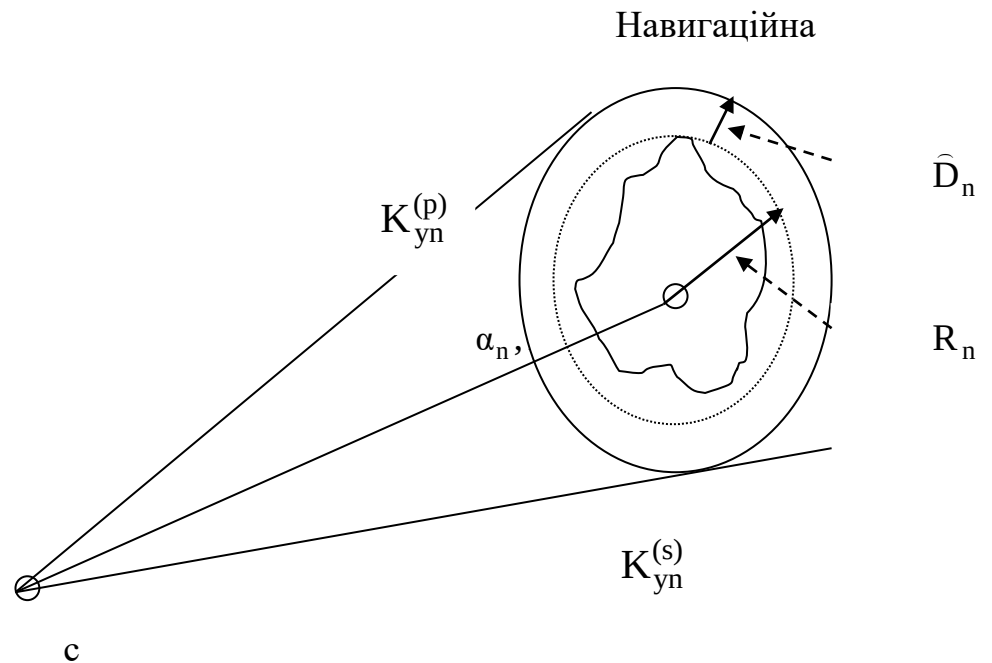


Рис. 4.21. Складна розподілена навігаційна небезпека

Після визначення граничні значення курсів ухилення $K_{yn}^{(p)}$ і $K_{yn}^{(s)}$ кожного з суден, що зближаються, граничні курси у вигляді горизонтальних і вертикальних ліній наносяться на відображення області небезпечних курсів, як показано в раніше наведених прикладах для точкової і розподіленої лінійної навігаційних небезпек.

4.3. Висновки за четвертим розділом

У розділі розглянуто питання врахування інерційності при повороті суден, що небезпечно зближаються, і наявності навігаційних небезпек в районі їх маневрування при формуванні області небезпечних курсів суден. Показано, що через інерційність суден при їх повороті дистанція найкоротшого зближення виявляється менше розрахункової, тому при побудові області небезпечних курсів її межі розраховуються для гранично-допустимої дистанції зближення, яка збільшена на величину втрати дистанції найкоротшого зближення через інерційність судна. Запропоновано процедури обчислення збільшення гранично-допустимої дистанції методом послідовних наближень для різних моделей обертального руху судна. Розроблено комп'ютерну програму розрахунку меж області небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден і уточнено процедуру вибору безпечних курсів ухилення суден для розходження. Наведено чисельні приклади.

Розглянуто облік навігаційних небезпек при виборі маневру розходження суден за допомогою області небезпечних курсів. Отримані вирази для розрахунку граничних курсів ухилення суден при наявності різних типів навігаційних небезпек: точкових, розподілених лінійних і складних розподілених. Показано відображення граничних курсів ухилення разом з областями небезпечних курсів і розроблено процедуру вибору безпечних курсів ухилення суден для розходження з урахуванням обмежень, що виникають через наявність навігаційних небезпек. Наведено необхідні чисельні приклади.

РОЗДІЛ 5.

ІМІТАЦІЙНЕ КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

5.1. Опис комп'ютерної інформаційної системи вибору маневру розходження суден зміною курсу з урахуванням інерційності суден при повороті і навігаційних небезпек

Отримані в дисертаційній роботі теоретичні результати, що дозволяють здійснювати вибір курсів суден, що розходяться, за допомогою області небезпечних курсів, межі якої розраховані з урахуванням інерційності суден при повороті, реалізовані за допомогою комп'ютерної програми, яка може бути використана при розробці навігаційної інформаційної системи зовнішнього управління процесом розходження суден. При цьому на курси ухилення суден накладаються обмеження за наявними навігаційним небезпеками.

Крім цього комп'ютерна імітаційна програма містить модуль моделювання процесу розходження суден з вибраними параметрами стратегії розходження, що дозволяє здійснити перевірку коректності запропонованого способу оцінки ступеня небезпеки зближення суден і вибору безпечного маневру їх розходження зміною курсів з використанням області небезпечних курсів.

Розглянемо спочатку процедуру вибору безпечного маневру розходження за допомогою комп'ютерної інформаційної системи, яка імітується першим модулем комп'ютерної програми моделювання. Спочатку задається початкова ситуація небезпечного зближення пари суден, для чого необхідно задати початкові пеленг і дистанцію, а також параметри руху суден. Перед початком введення параметрів початкової ситуації зближення на екран монітора виводиться зображення суден, як показано на рис. 5.1.

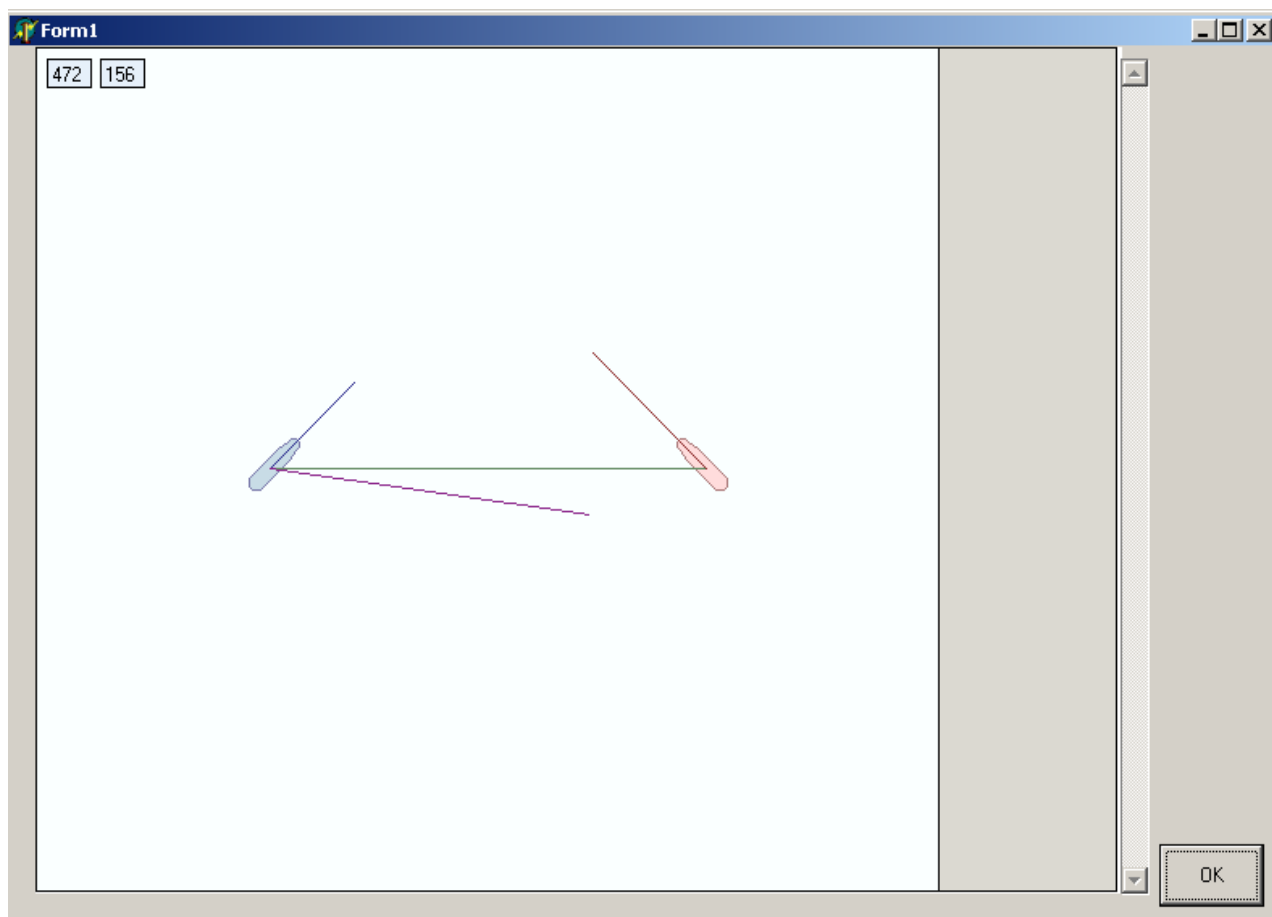


Рис. 5.1. Початковий інтерфейс імітаційної програми моделювання

За умовчанням параметри початкової ситуації зближення підібрані таким чином, що прогнозована дистанція найкоротшого зближення менше гранично-допустимої дистанції, тобто ситуація зближення є небезпечною. Для початку введення параметрів ситуації зближення необхідно скористатися клавішею «ОК», після чого відбувається ініціалізація клавіш для введення параметрів ситуації зближення і на інформаційних панелях відображаються значення параметрів руху суден, дистанція між ними і дистанція найкоротшого зближення (рис.5.2). З даного рисунку також видно, що активуються клавіші «Навігац.» і «Інерц.», за допомогою яких забезпечуються режими введення навігаційних небезпек і врахування інерційності суден при повороті. За замо-

вчуванням дані режими відключені. Як показано на рис. 3.5, для введення обраного параметра необхідно

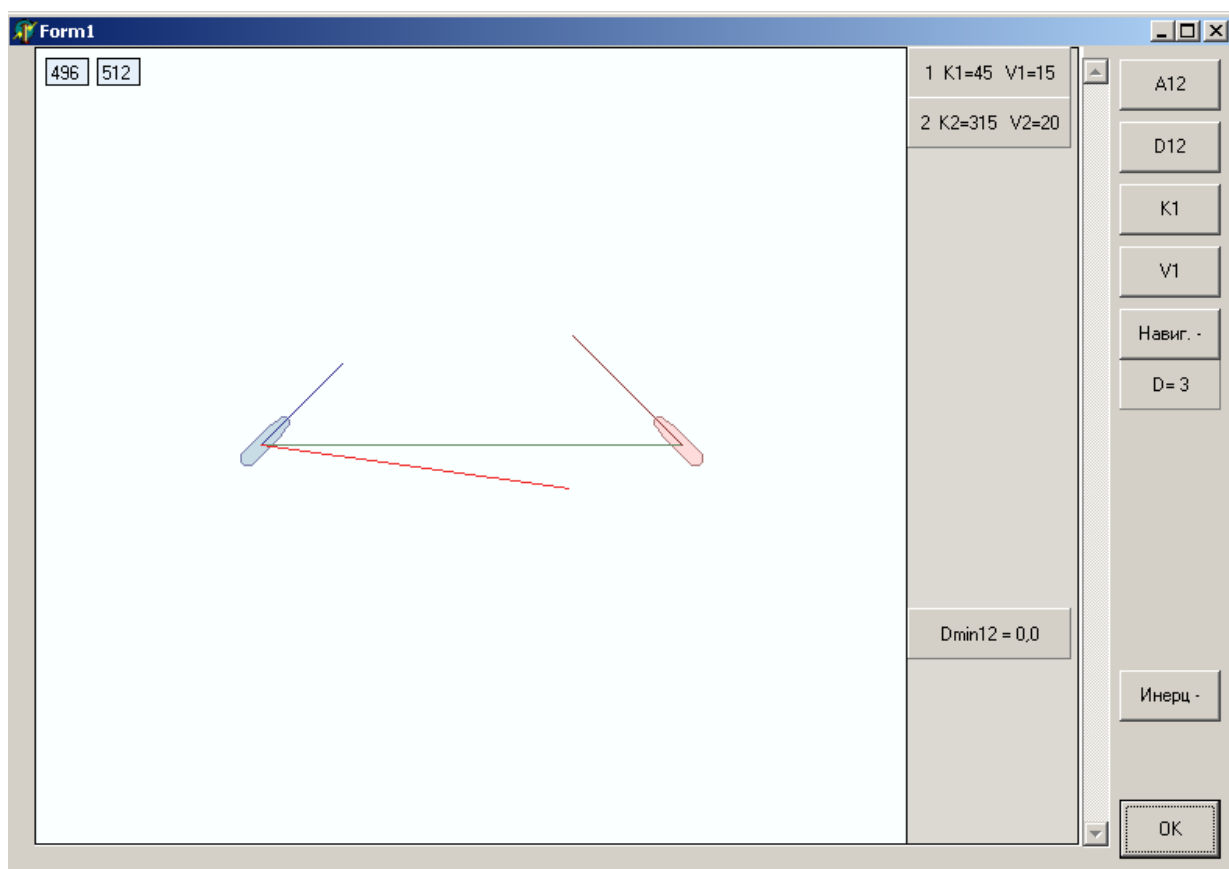


Рис. 5.2. Ініціалізація введення параметрів ситуації зближення

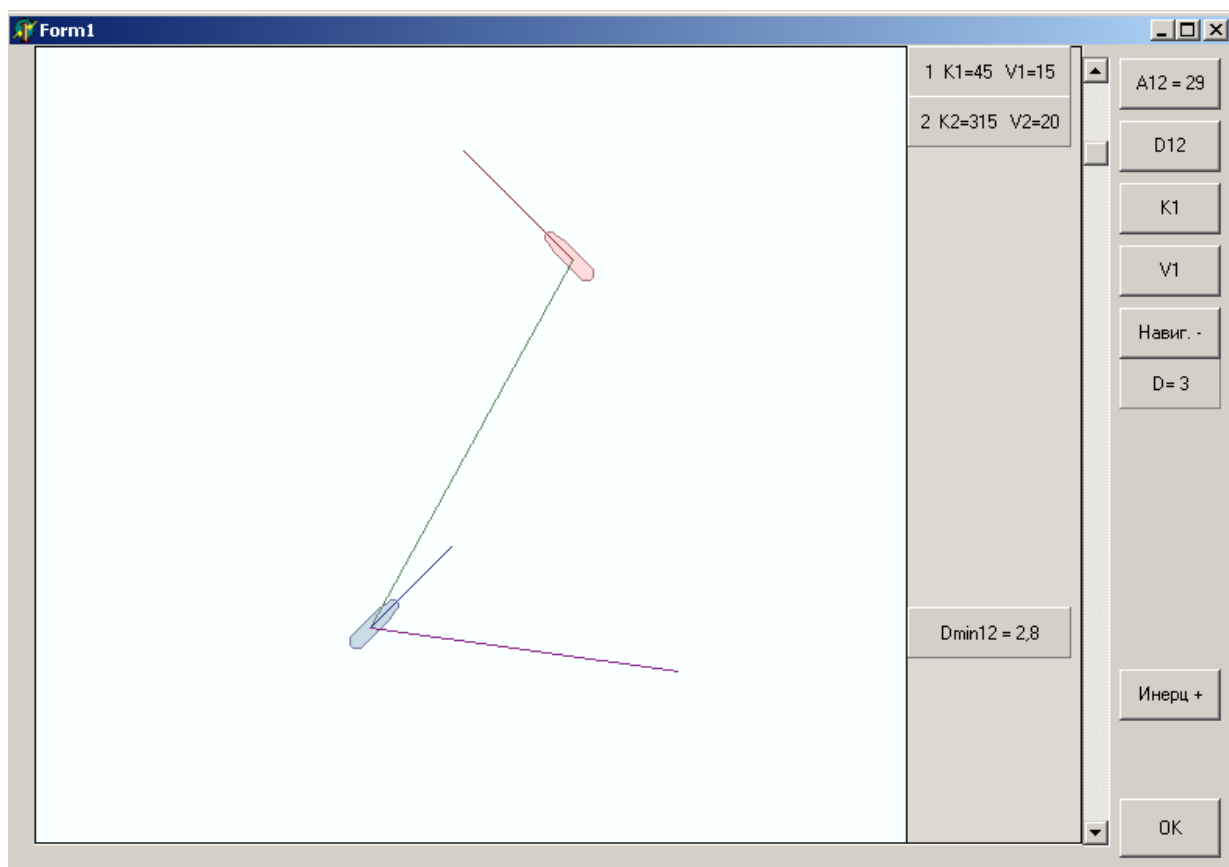


Рис. 5.3. Введення пеленга ситуації зближення

«Клікнути» одним натисканням клавіші. Як приклад на рис. 5.3 обраний пеленг, після вибору відповідної клавіші значення пеленга вводиться за допомогою лінійки прокрутки (Scroll Bar), причому це значення пеленга відображається на клавіші параметра (в даному прикладі введений пеленг дорівнює 29°). Також відбувається зміна відображуваної ситуації в залежності від значень параметрів, що вводяться.

Для генерування небезпечної ситуації зближення за допомогою третьої клавіші вибору курсів суден «K1» і лінійки прокрутки був введений курс першого судна 69° (рис. 5.4). При повторному використанні цієї клавіші лінійкою прокрутки вводиться курс другого судна, рівний 188° . При цьому прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення дорівнює 0,2 милі, що значно менше гранично-допустимої дистанції, рівної 3 милі. При повторному використанні цієї клавіші лінійкою прокрутки вводиться курс другого судна, рівний 188° . При цьому прогнозоване значення дистанції найкоротшого збли-

ження дорівнює 0,2 милі, що значно менше гранично-допустимої дистанції, що дорівнює 1 милі.

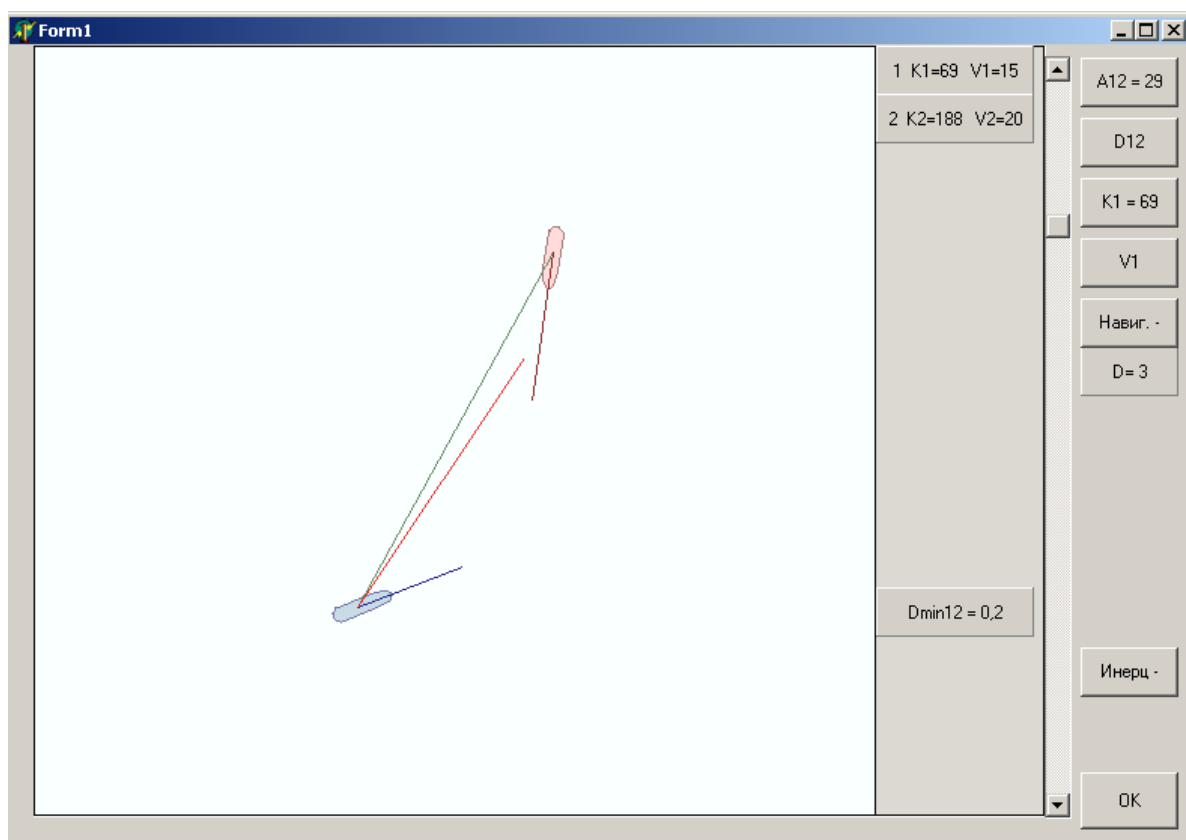


Рис. 5.4. Ввод курсів суден

Після завершення формування небезпечної ситуації зближення суден слід повторно скористатися клавішею «ОК», в результаті чого здійснюється вивід області небезпечних курсів суден без урахування їх інерційності при повороті, що показано на рис. 5.5. Також ініціалізуються клавіші «K1» і «K2» для вибору курсів ухилення першого і другого суден. Аналіз рис. 5.5 показує, що точка початкових курсів суден знаходиться в області небезпечних курсів, тому маневр розходження є необхідним.



Рис. 5.5. Область небезпечних курсів суден без урахування їх інерційності

Для вибору безпечних курсів ухилення необхідно вибрати точку межі області небезпечних курсів, яка мінімально відстоїть від точки, що відповідає початковим курсам зближення суден. За допомогою клавіш «K1», «K2» і лінійки прокрутки були обрані курси ухилення суден, як показано на рис. 5.6, які належать верхній межі області небезпечних курсів, причому точка, відповідна курсам ухилення, знаходиться в центрі індикатора у вигляді кола, а значення курсів ухилення, як впливає з рисунку, дорівнюють $K_{1y}=90^\circ$ і $K_{2y}=199^\circ$. На інформаційних панелях відображаються зміни курсів суден.



Рис. 5.6. Вибір безпечних курсів ухилення суден K_{1y} і K_{2y}

Для врахування інерційності суден при повороті слід при виборі параметрів ситуації зближення використовувати клавішу «інерція. +». Знак «+», який з'явився на клавіші, свідчить про включення режиму врахування інерційності суден (рис. 5.7). Для порівняльного аналізу виберемо ту ж початкову ситуацію небезпечного зближення. Після завершення введення параметрів початкової ситуації зближення на екран монітора виводиться область небезпечних курсів суден з урахуванням їх інерційності (рис. 5.8), яка містить в собі відповідну область без урахування інерційності суден. Безпечні курси ухилення суден визначаються за допомогою меж області з урахуванням інерційності. Як показано на рис. 5.9, точка відповідна курсам ухилення суден, характеризується координатами $=92^\circ$ і $=201^\circ$. При цьому гранично-

допустиму дистанцію збільшено на 1 кабельтов, а курси ухилення збільшено на 2° .

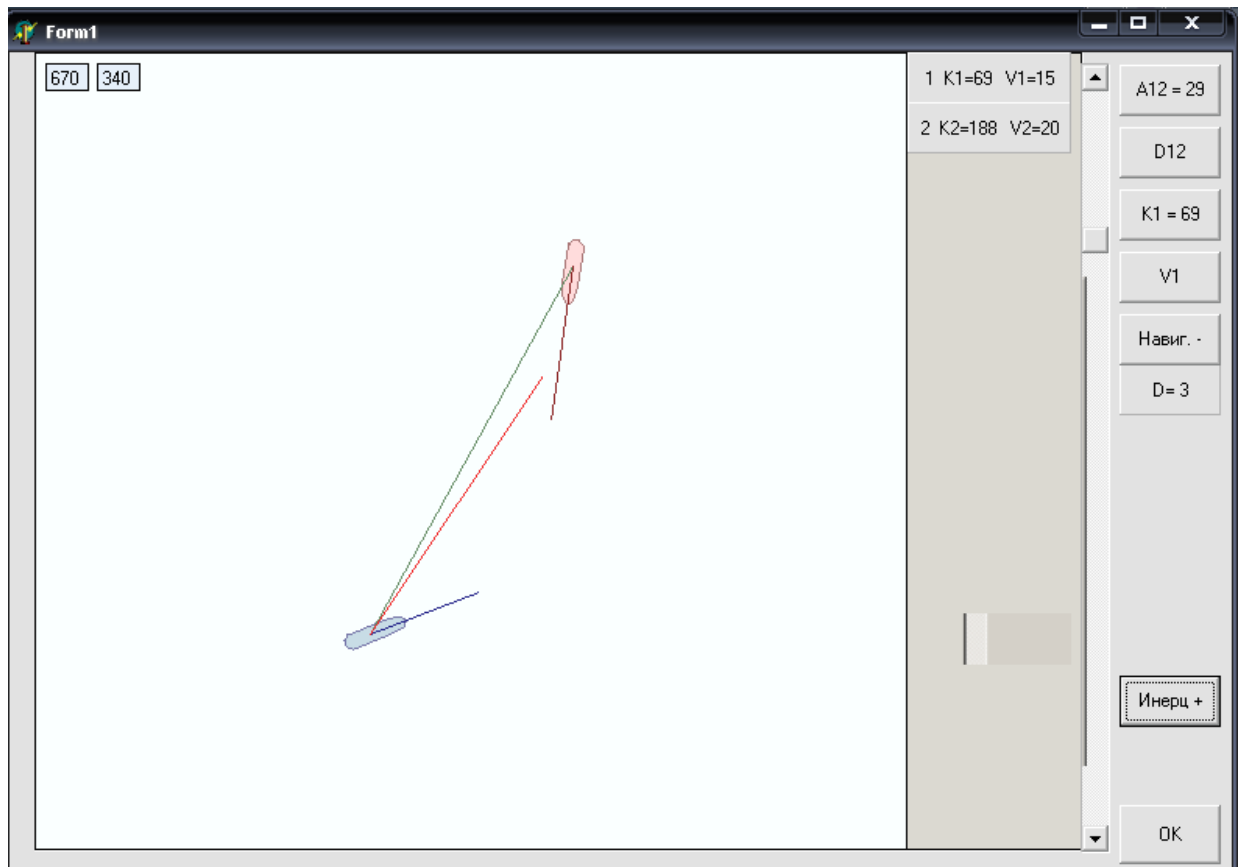


Рис. 5.7. Вибір режиму врахування інерційності суден при повороті



Рис. 5.8. Область небезпечних курсів суден з урахуванням їх інерційності



Рис. 5.9. Курси ухилення K_{1y} і K_{2y} з урахуванням інерційності суден

Наведений приклад характеризувався співвідношенням швидкостей суден $V_2 > V_1$. Розглянемо випадок урахування інерційності суден при повороті для випадку $V_2 = V_1$. Для цього було сформовано початкову ситуацію небезпечного зближення, наведену на рис. 5.10, з параметрами: пеленгом $\alpha_{12}=87^\circ$, дистанцією $D_{12}=3$ милі, параметрами руху суден $K_1=45^\circ$, $K_2=315^\circ$, $V_2 = V_1=15$ вузлів, з гранично-допустимою дистанцією $D_d=1$ миля. При цій початковій ситуації зближення прогнозована дистанція найкоротшого зближення $D_{\min}=0,15$ милі.

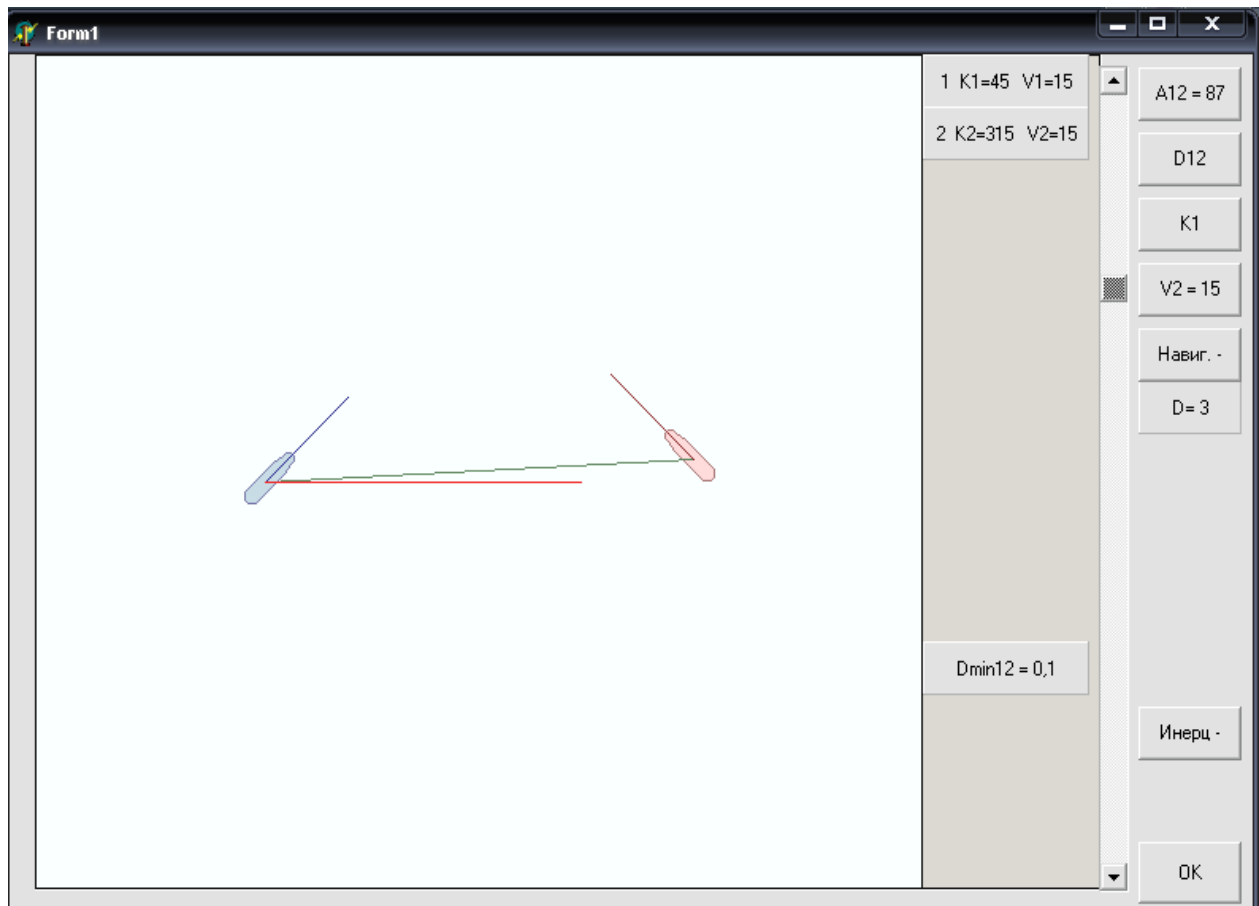


Рис. 5.10. Початкова ситуація небезпечного зближення при $V_2 = V_1$

Цій початковій ситуації небезпечного зближення відповідає область небезпечних курсів без урахування інерційності суден при повороті, показана на рис. 5.11. Її межі є прямими паралельними лініями. Розглянемо можливість розходження суден тільки ухиленням другого судна при незмінному курсі першого судна. З цією метою використовуємо тільки клавішу «K2» і лінійкою прокрутки обираємо курс ухилення другого судна до перетину вертикальної лінії з точкою нижньої межі області, загальною з лінією курсу першого судна (рис. 5.12). При цьому безпечний курс без урахування інерційності судна ухилення другого судна $= 270^\circ$.



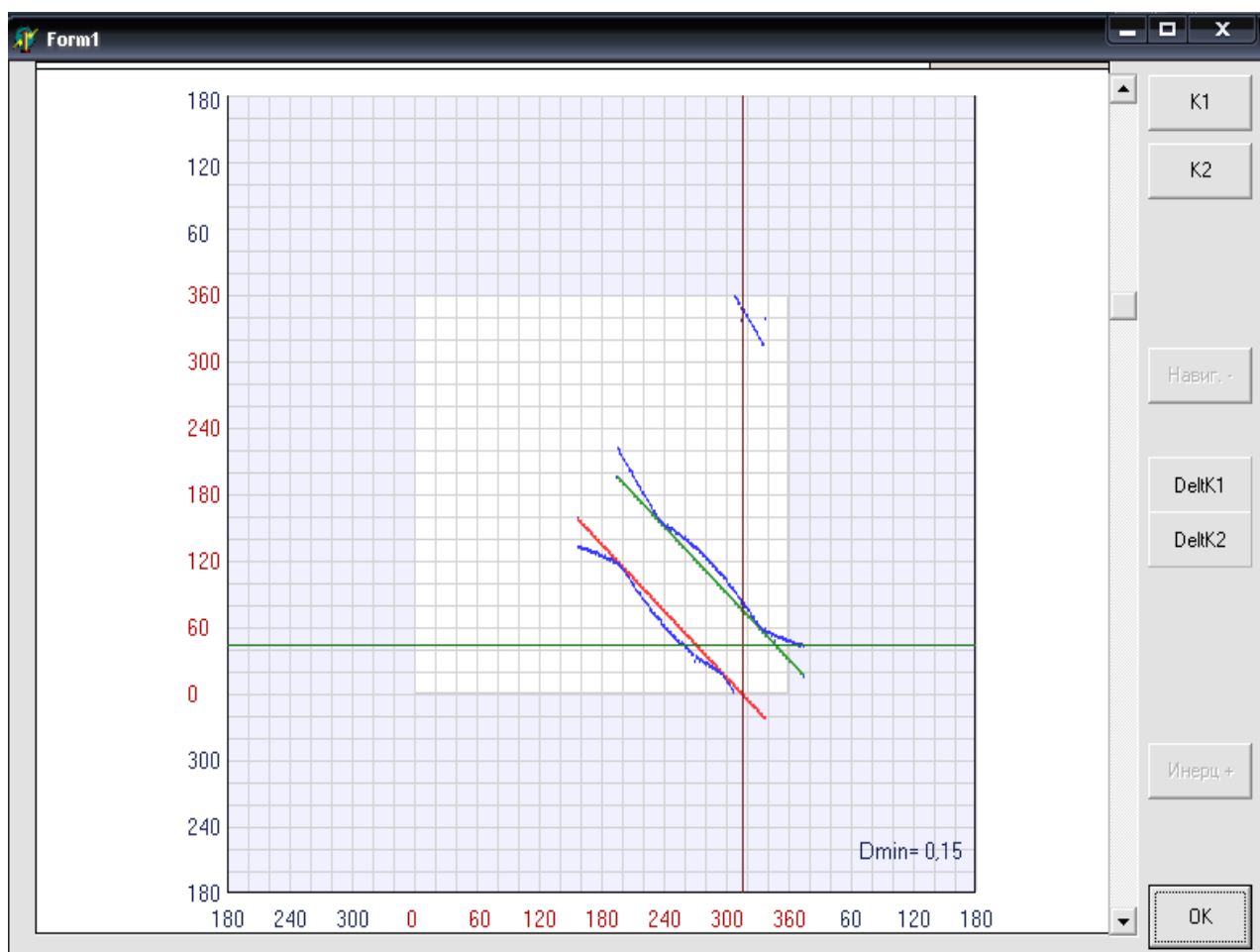
Рис. 5.11. Область небезпечних курсів без урахування інерційності суден
($V_2 = V_1$)



Рис. 5.12. Безпечний курс ухилення K_{2y}

Отже, якщо не враховувати інерційність судна, то при зміні курсу другого судна вліво на 45° судна розійдуться безпечно.

Якщо при даній ситуації небезпечного зближення суден використовувати режим урахування інерційності суден при повороті, то межі області небезпечних курсів приймають вид, показаний на рис. 5.13. вибираючи курс



5.13. Область небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден ($V_2 = V_1$)

ухилення другого судна, отримаємо $K_{2y}=254^\circ$ (рис. 5.14), тобто на 16° відрізняється від курсу ухилення без урахування інерційності судна.

На рис. 5.15 показано ситуацію небезпечного зближення для випадку $V_2 < V_1$, яка характеризується наступними параметрами: пеленгом $\alpha_{12}=100^\circ$,

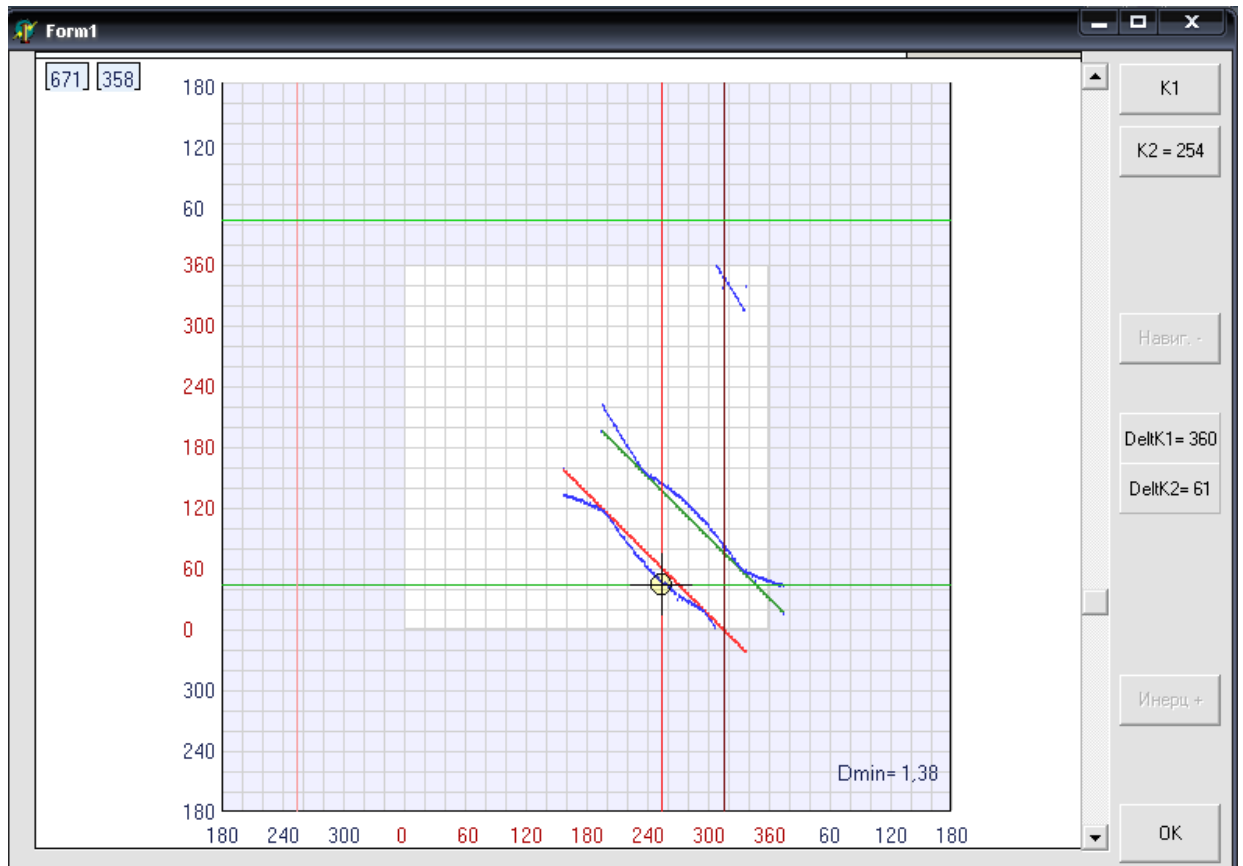


Рис. 5.14. Безпечний курс ухилення K_{2y} з урахуванням інерційності судна

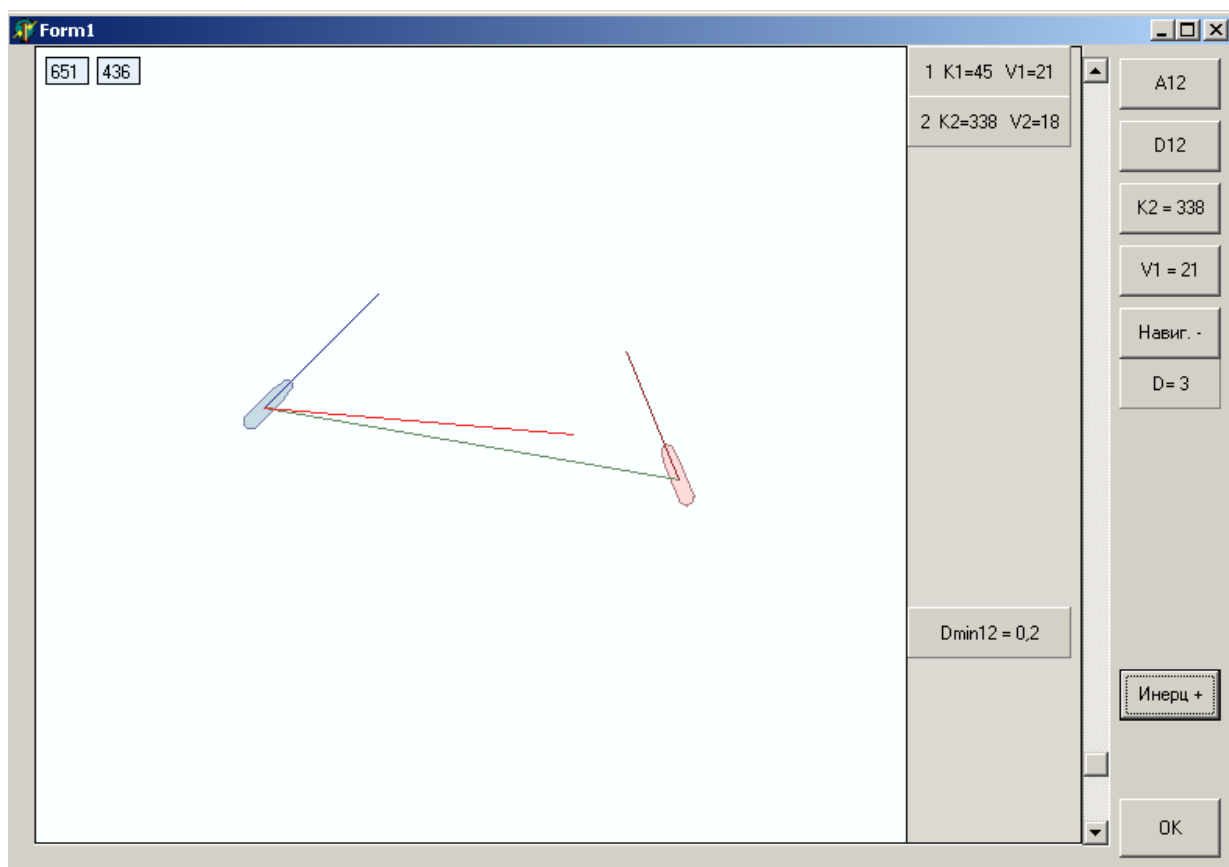


Рис. 5.15. Початкова ситуація небезпечного зближення при $V_2 < V_1$

дистанцією $D_{12}=3$ милі, параметрами руху суден $K_1=45^\circ$, $K_2=338^\circ$, $V_1=21$ вузел, $V_2=18$ вузлів. Гранично-допустима дистанція та ж, а прогнозована дистанція найкоротшого зближення $D_{\min}=0,26$ милі. Спочатку режим врахування інерційності суден при повороті при формуванні області небезпечних курсів був відключений і межі області в цьому випадку показані на рис. 5.16, причому її особливістю є те, що курс другого судна приймає всі значення з області зміни від 0° до 360° .

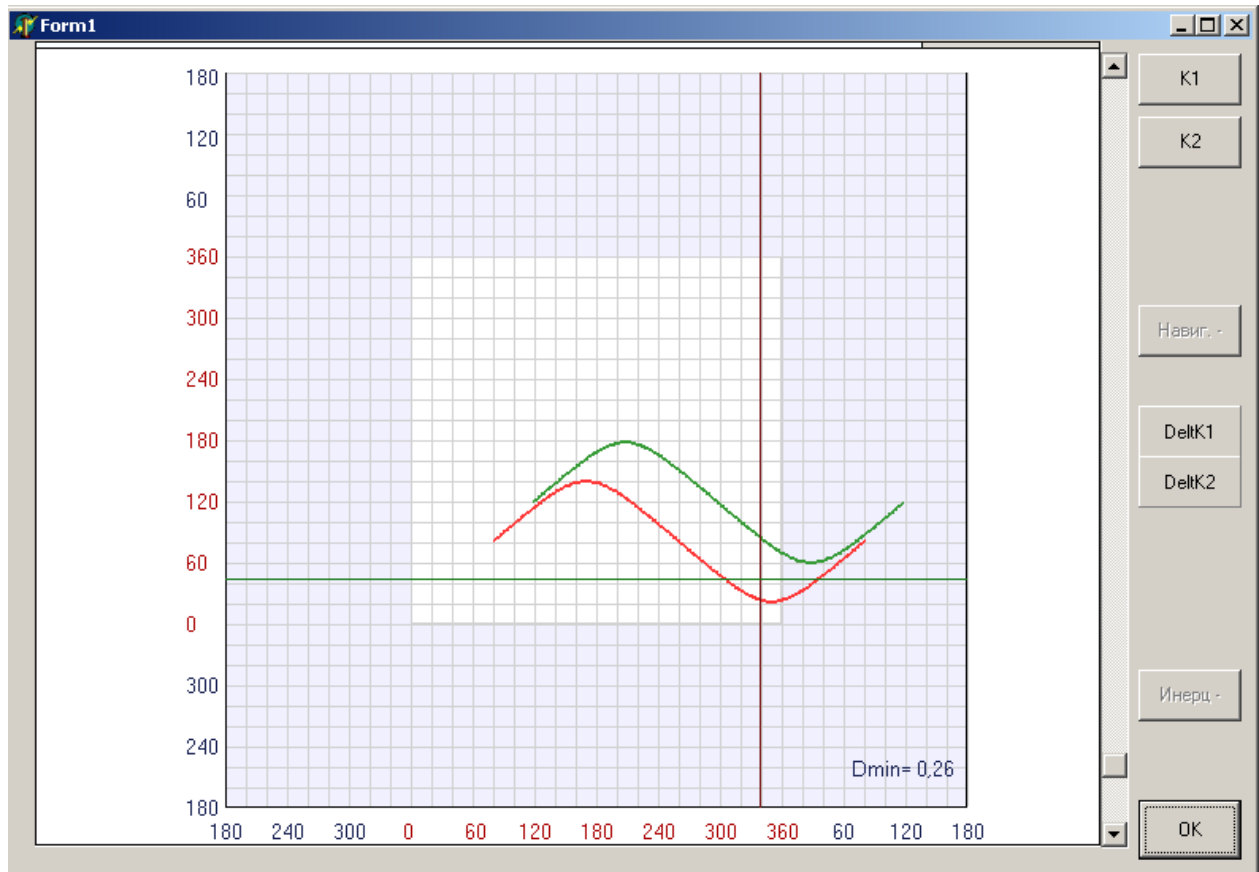


Рис. 5.16. Область небезпечних курсів без урахування інерційності суден
($V_2 < V_1$)

Як і в попередньому випадку будемо визначати курс ухилення тільки другого судна, залишаючи курс першого судна незмінним. Як впливає з рис. 5.17, $K_{2y}=303^\circ$. На рис. 5.18 показана область небезпечних курсів суден з урахуванням їх інерційності при повороті, межі якої охоплюють відповідну область без урахування інерційності судна. При виборі курсу ухилення



Рис. 5.17. Курс ухилення K_{2y} без урахування інерційності судна при

$$V_2 < V_1$$



5.18. Область небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден ($V_2 < V_1$)

другого судна вертикальну лінію, яка відповідає його курсу ухилення, слід поєднувати з точкою перетину нижньої межі області з урахуванням інерційності і лінією курсу першого судна. У цьому випадку курс ухилення другого судна $K_{2y}=281^\circ$, що на 22° відрізняється від відповідного курсу без урахування інерційності суден (рис.5.19).

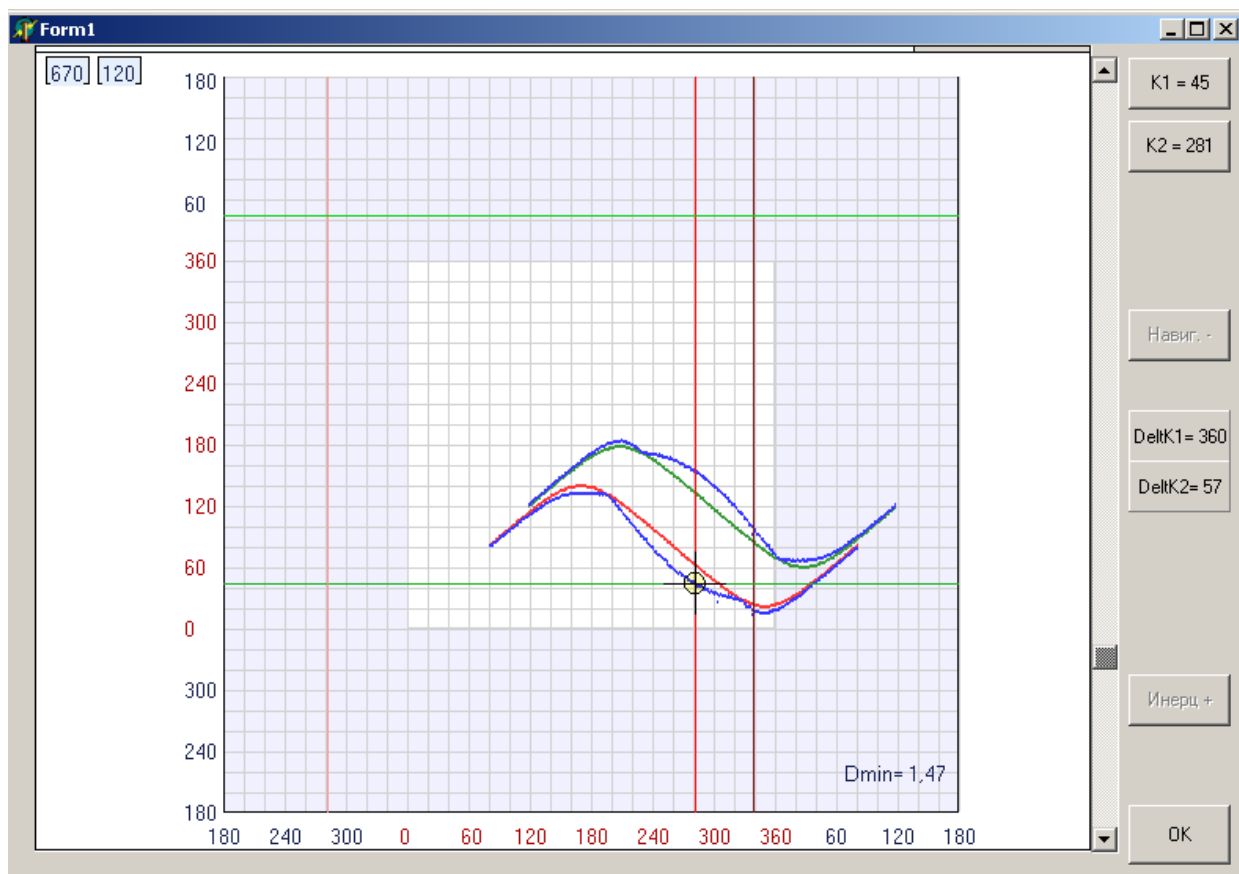


Рис. 5.19. Курс ухилення K_{2y} з урахуванням інерційності судна при

$$V_2 < V_1$$

При наявності навігаційних небезпек їх слід враховувати при виборі курсів ухилення суден. В імітаційній комп'ютерній програмі при формуванні ситуації небезпечного зближення передбачено введення навігаційних небезпек, як точкової, так і лінійно розподіленої. Спочатку розглянемо ситуацію небезпечного зближення суден при наявності точкової навігаційної небезпеки в районі їх маневрування. За допомогою імітаційної програми вибираються параметри ситуації небезпечного зближення пари суден. Як приклад розглядаємо таку ситуацію зближення: пеленг $\alpha_{12}=67^\circ$, дистанція $D_{12}=3$ милі, параметри руху суден $K_1=21^\circ$, $K_2=285^\circ$, $V_1=15$ вузлів, $V_2=20$ вузлів. Гранично-допустима дистанція незмінна, прогнозована дистанція найкоротшого збли-

ження $D_{\min} = 0,17$ милі. Дана ситуація небезпечного зближення суден показана на рис. 5.20.

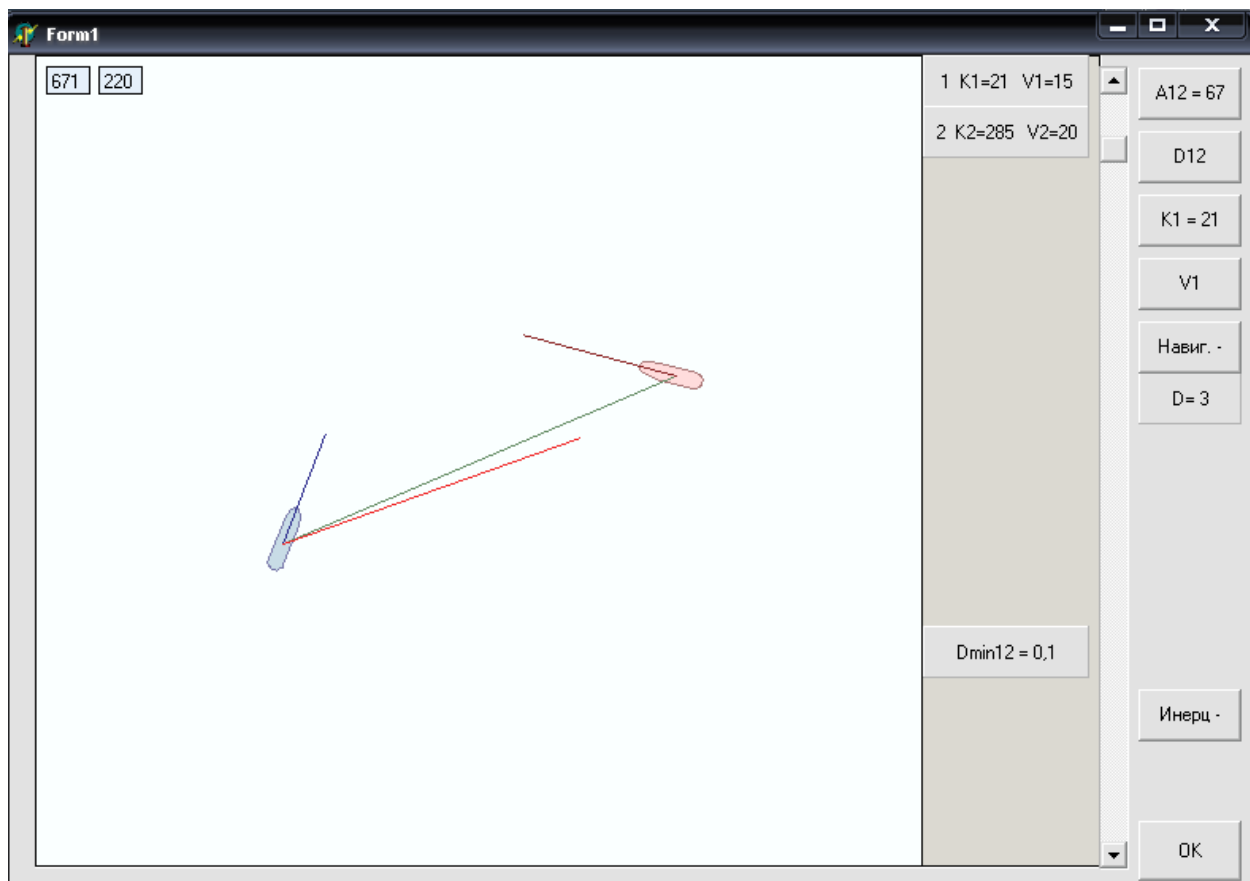


Рис. 5.20. Початкова ситуація небезпечного зближення

Для введення параметрів точкової навігаційної небезпеки необхідно один раз "клікнути" клавішу "Навиг.", В результаті чого на цій клавіші з'являється напис "Навиг. +1" (рис. 5.21). Положення точкової навігаційної небезпеки задається пеленгом і дистанцією відносно до першого судна. За замовчуванням пеленг на навігаційну небезпеку $\alpha_{nv} = 50^\circ$, а дистанція $D_{nv} = 2,3$ милі. Використовуючи верхню клавішу "Anv" і лінійку прокрутки,

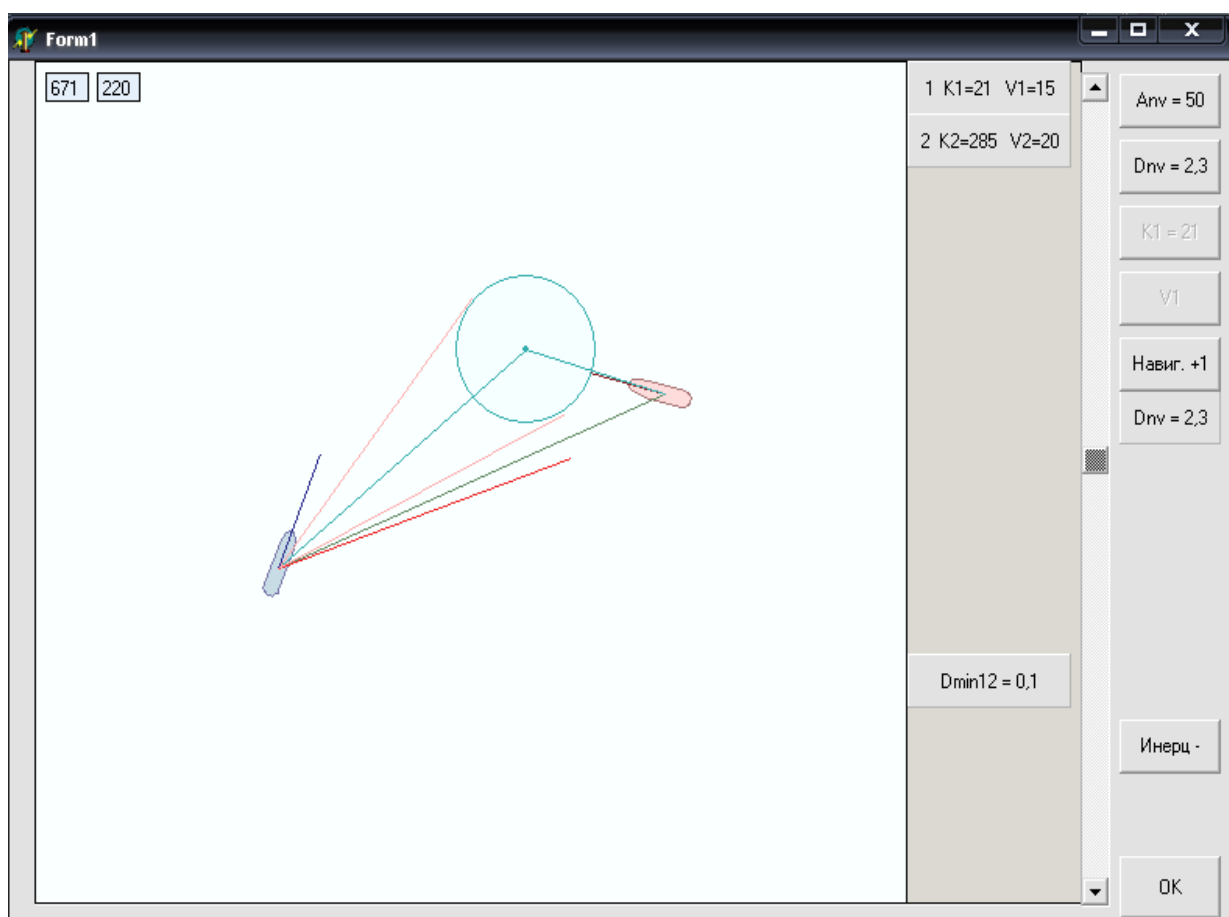


Рис. 5.21. Положення точкової навігаційної небезпеки за замовчуванням

пеленг на точкову навігаційну небезпеку обраний рівним 17° , а відстань до неї введена лінійкою прокрутки після "клікання" клавіші "Dnv" рівною 2,5 милі. Таким чином, початкова ситуація небезпечного зближення суден містить точкову навігаційну небезпеку, яка розташовується відносно першого судна за пеленгом $\alpha_{nv}=17^\circ$ і на дистанції $D_{nv}=2,5$ милі, як показано на рис. 5.22. Область небезпечних курсів суден з урахуванням їх інерційності при повороті і навігаційні обмеження на курси ухилення суден показані на рис. 5.23. Для першого судна обмеження за курсом ухилення складають від 4° до 26° , а для другого судна - від 290° до 315° . Причому граничні курси ухилення на рис. 5.23 показані відповідними горизонтальними і вертикальними лініями.

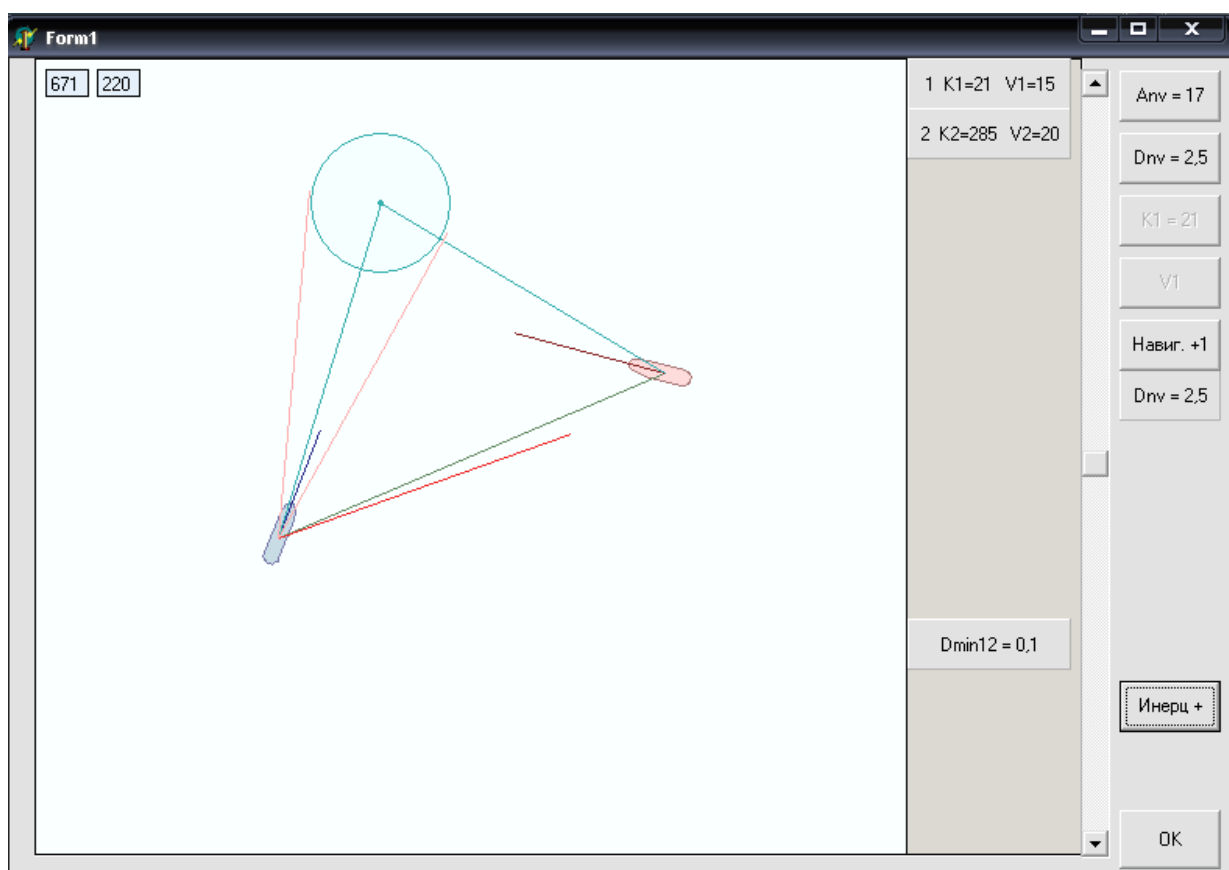


Рис. 5.22. Початкове положення точкової навігаційної небезпеки

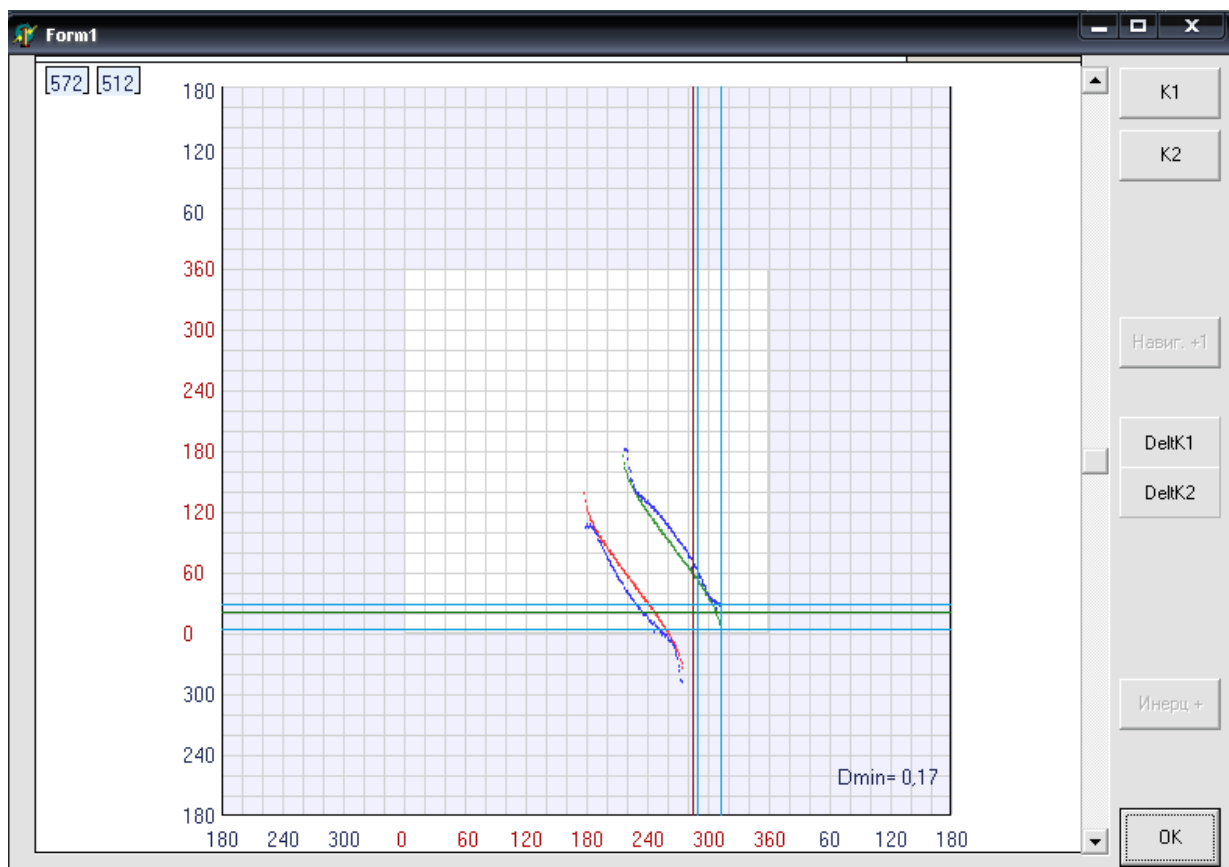


Рис. 5.23. Обмеження за крапковою навігаційною небезпекою

Вибір курсів ухилення при спільному врахуванні обмеження щодо зближення між суднами та обмежень за точковою навігаційною небезпекою показаний на рис. 5.24. У цьому випадку курс ухилення першого судна дорівнює нижній межі навігаційного обмеження, тобто $K_{1y}=4^\circ$, а курс ухилення другого судна знаходиться на нижній межі області небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден і дорівнює $K_{2y}=250^\circ$.

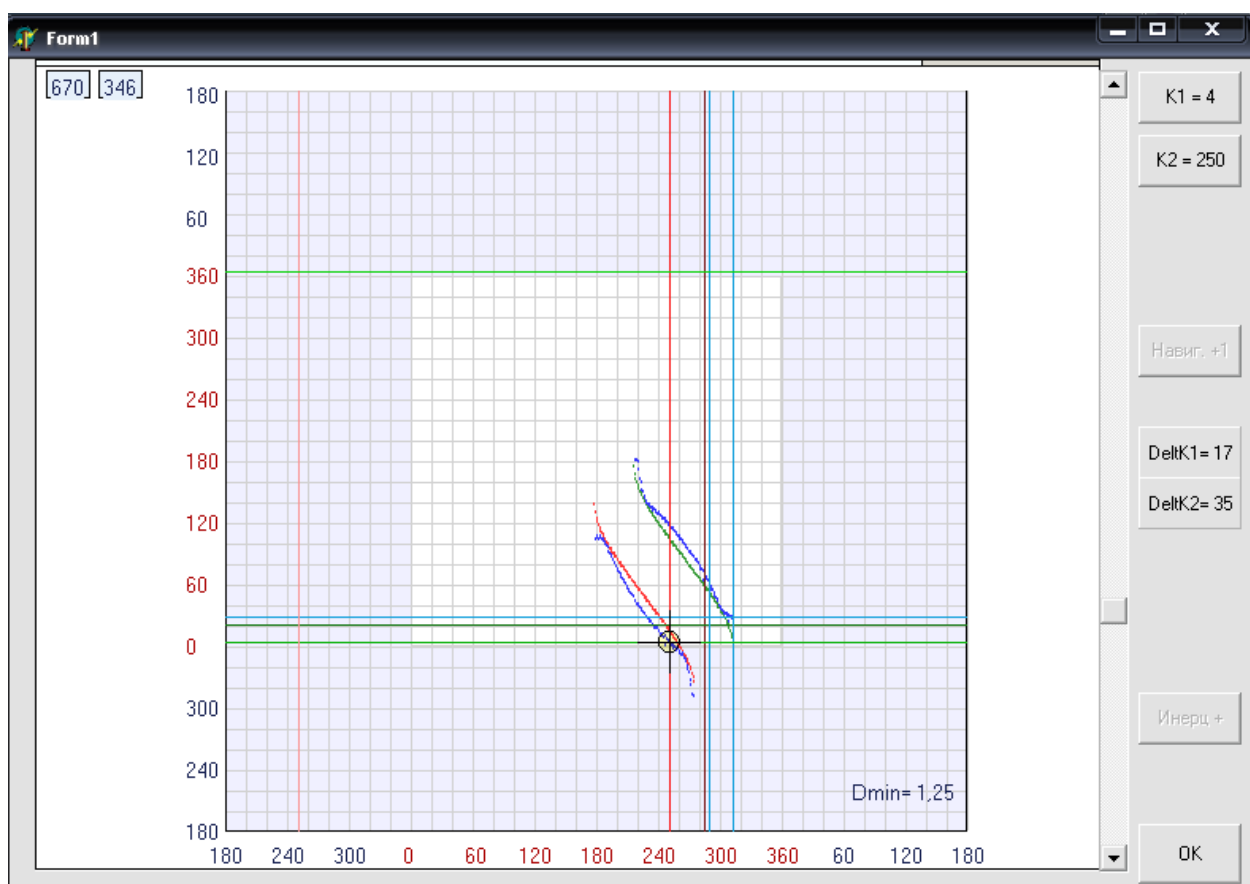


Рис. 5.24. Курси ухилення при точковій навігаційній небезпеці

Для розгляду лінійної розподіленої навігаційної небезпеки на рис. 5.25 показано ситуацію небезпечного зближення суден з параметрами: пеленгом $\alpha_{12}=100^\circ$, дистанцією $D_{12}=3$ миль, параметрами руху суден $K_1=45^\circ$, $K_2=315^\circ$, $V_1=15$ вузлів, $V_2=20$ вузлів. Значення гранично-допустимої дистанції залишається незмінним, а прогнозована дистанція найкоротшого зближення $D_{\min}=0,09$ миль. Для введення лінійної розподіленої навігаційної

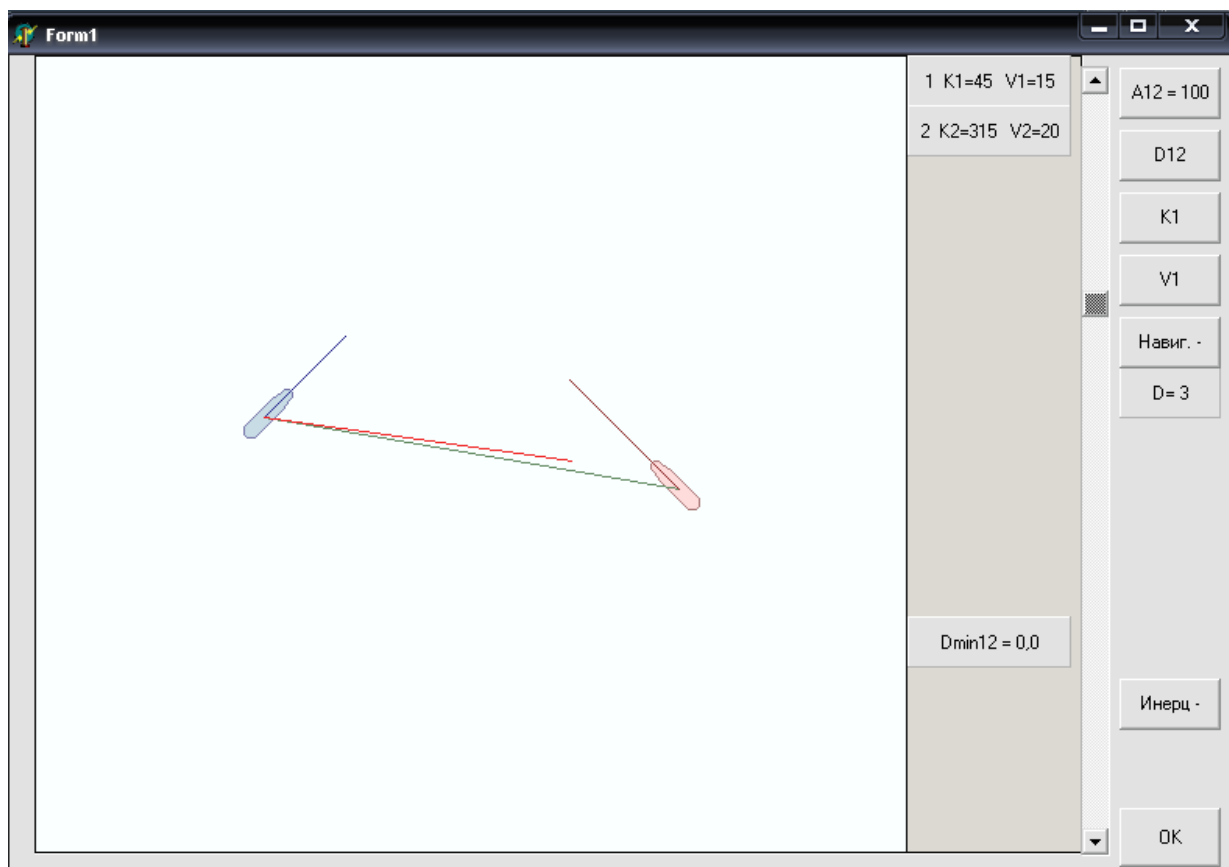


Рис. 5.25. Ситуація небезпечного зближення в разі лінійної перешкоди

небезпеки необхідно двічі "клікнути" клавiшею "Навiг.", при цьому на цiй клавiшi з'являється напис "Навiг. +2", а також виводиться лiнiйна розподiлена навігацiйна небезпека, параметри якої задані вiдносно першого судна (пеленгом i дистанцiєю на точки початку i кiнця небезпеки), причому за замовчуванням вони мають таке значення (рис. 5.26): пеленг $\alpha_{nv1}=30^\circ$ i дистанцiя $D_{nv1}=2,0$ милi на початкову точку, а також пеленг (рис. 5.26): пеленг $\alpha_{nv2}=60^\circ$ i дистанцiя $D_{nv2}=3,0$ милi на кiнцеву точку лiнiйної розподiленої навігацiйної небезпеки. Причому гранично-допустима дистанцiя зближення з мiлиною дорiвнює 0,5 милi. На рис. 5.27 показано змiну положення початкової точки лiнiйної розподiленої навігацiйної небезпеки, причому пеленг на неї вибирається за допомогою одноразового "клiкання" клавiшi "Anv1" i лiнiйкою про-

крутки обраний пеленг $\alpha_{nv1}=30^\circ$, а дистанція вводиться за допомогою клавіші "Dnv1" лінійкою $\alpha_{nv1}=30^\circ$, а

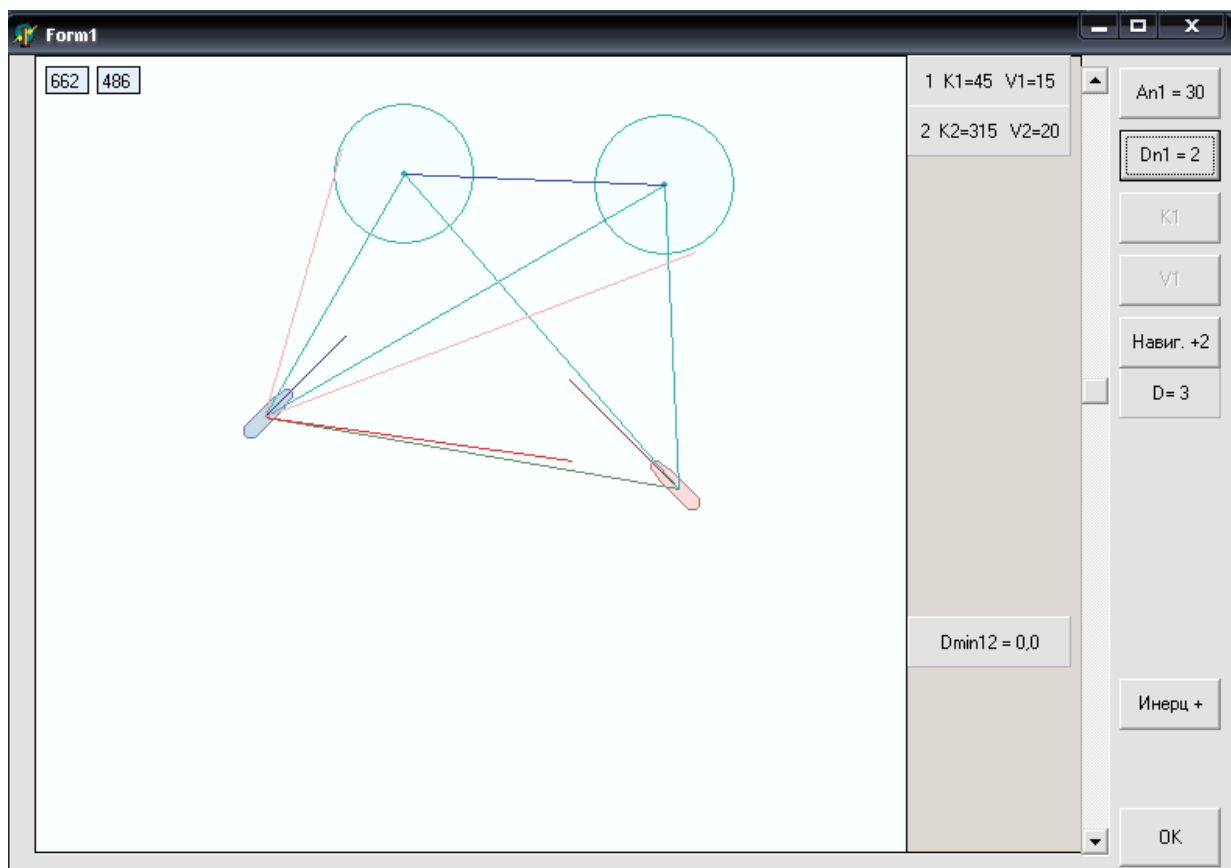


Рис. 5.26. Початкова ситуація небезпечного зближення

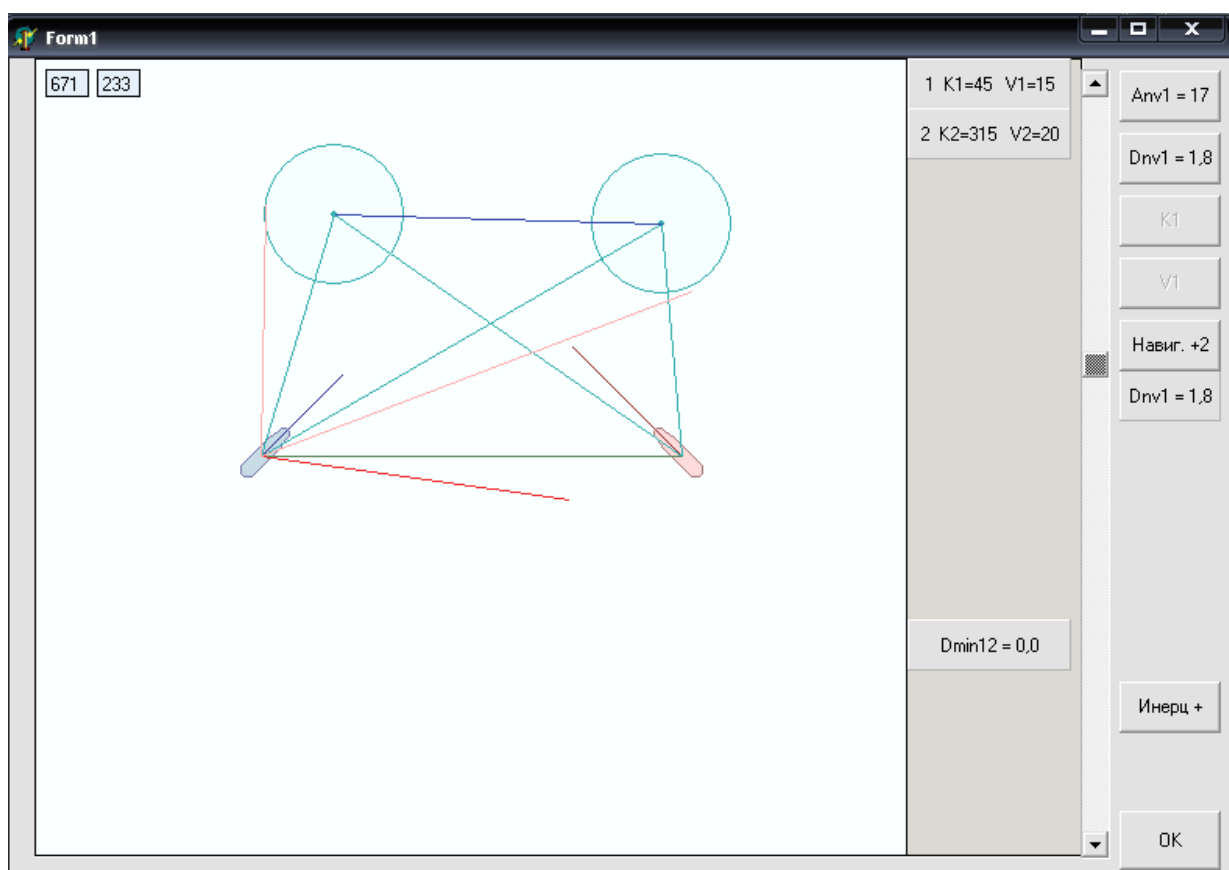


Рис. 5.27. Зміна положення початкової точки лінійної небезпеки

дистанція вводиться за допомогою клавіші "Dnv1" лінійкою прокрутки і дорівнює $D_{nv1}=2,0$ милі.

Зміна положення кінцевої точки лінійної розподіленої навігаційної небезпеки показано на рис. 5.28. Для цього слід двічі "клікнути" верхню клавішу "Anv2" і за допомогою лінійки прокрутки введений пеленг $\alpha_{nv2}=54^\circ$, а за допомогою дворазового "клікання" клавіші "Dnv2" лінійкою прокрутки обрана дистанція $D_{nv2}=3,5$ милі. Для даної ситуації небезпечного зближення

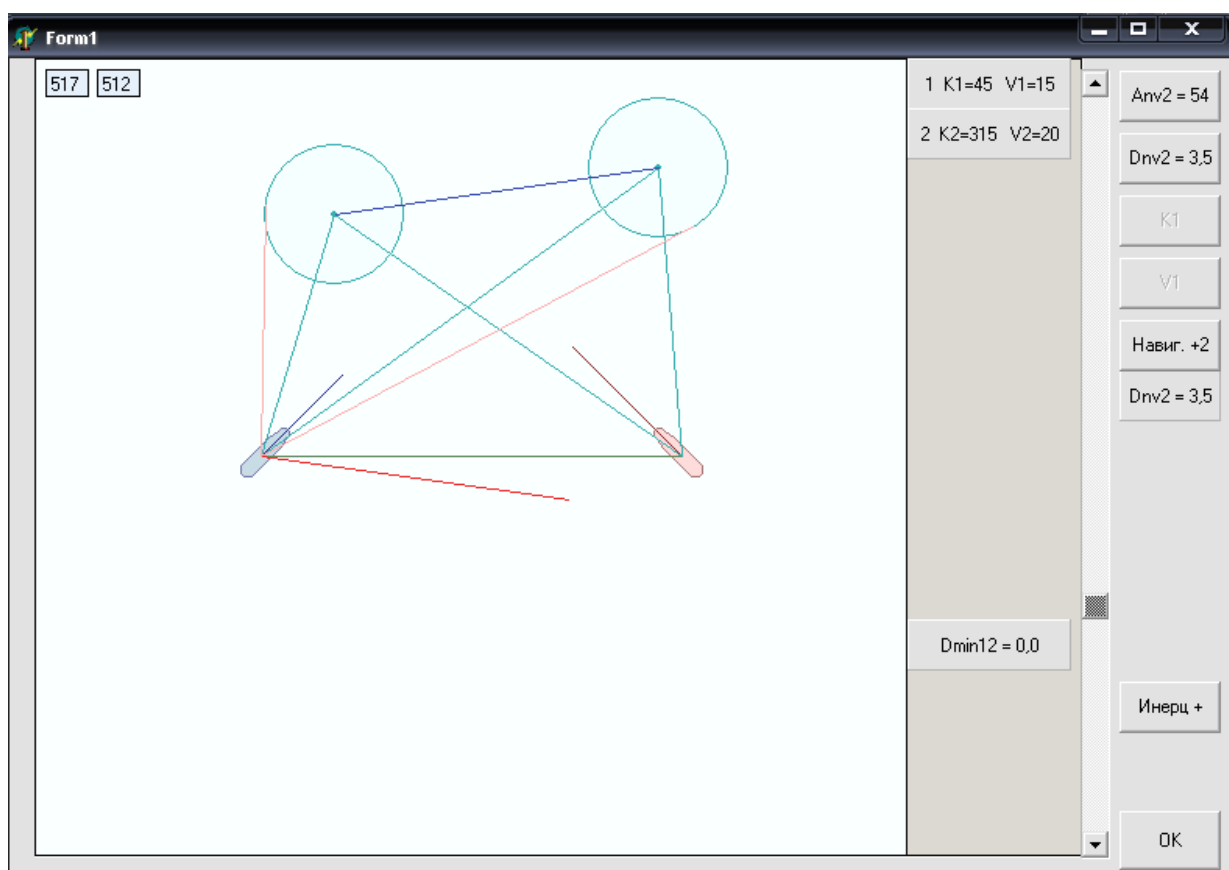


Рис. 5.28. Зміна положення кінцевої точки лінійної небезпеки

суден на рис. 5.29 показано область небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден при повороті, а також показані обмеження, викликані наявністю лінійної розподіленої навігаційної небезпеки, які виражаються граничними курсами неприпустимих відхилень. Так, для першого судна лінійна розподілена навігаційна небезпека обмежує курси ухилення від 2° до 63° , а для другого судна неприпустимі курси ухилення через навігаційної небезпеки укладені в діапазоні від 305° до 7° . Межі зазначених підмножин неприпустимих курсів ухилення виділені паралельними горизонтальними і вертикальними лініями. При виборі безпечних курсів ухилення слід враховувати дані обмеження і не вибирати курси з зазначених діапазонів.



Рис. 5.29. Область небезпечних курсів і навігаційні обмеження

На рис. 5.30 ілюстровано вибір безпечних курсів ухилення суден з урахуванням згенерованої лінійної розподіленої навігаційної небезпеки та інерційності суден при повороті. Маневр розбіжності передбачає ухилення обох суден з програмних траєкторій руху. Оптимальні курси ухилення суден, мінімально відрізняються від програмних, знаходяться на межах навігаційного обмеження. З рисунку видно, що курс ухилення першого судна дорівнює нижній межі, тобто $K_{1y}=2^\circ$, як і курс ухилення другого судна,

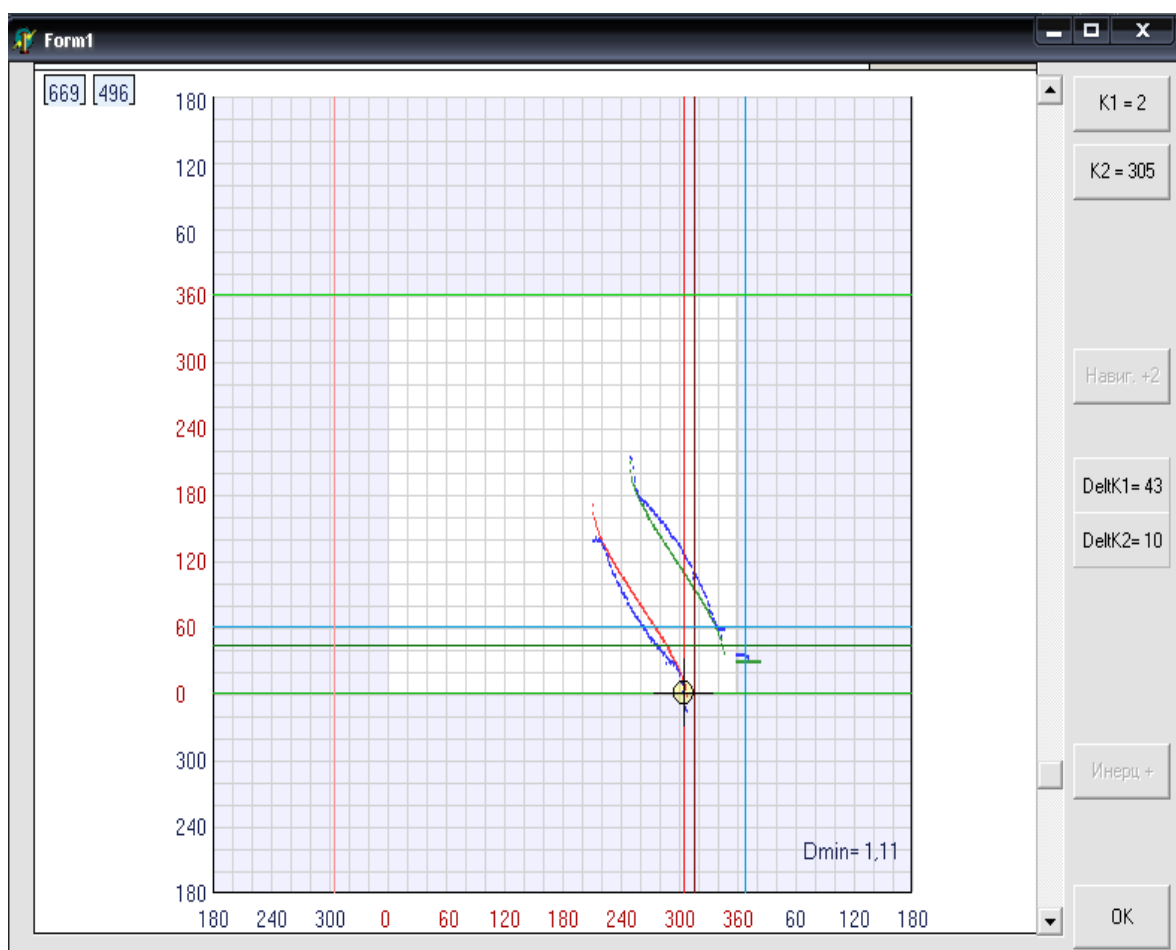


Рис. 5.30. Вибір безпечних курсів ухилення

що дорівнює $K_{2y}=305^\circ$.

Таким чином, за допомогою області небезпечних курсів оперативно проводиться вибір оптимальних курсів ухилення з урахуванням інерційності суден і наявних навігаційних небезпек, причому зазначена процедура вимагає комп'ютерної реалізації, як це показано в даному підрозділі.

5.2. Перевірка коректності отриманих результатів імітаційним моделюванням

Для перевірки коректності способу вибору маневру розходження суден за допомогою області небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден і на-

явних в районі маневрування навігаційних небезпек (точкових і лінійно розподілених) в імітаційній програмі є модуль, за допомогою якого проводиться відтворення вибраного маневру розбіжності, причому для обертального руху суден обрано модель з постійною кутовою швидкістю. Для прикладу розглянемо початкову ситуацію небезпечного зближення (рис. 5.31) з параметрами: пеленгом $\alpha_{12}=25^\circ$, дистанцією $D_{12}=3$ милі, параметрами руху суден $K_1=45^\circ$, $K_2=191^\circ$, $V_1=15$ вузлів, $V_2=20$ вузлів.

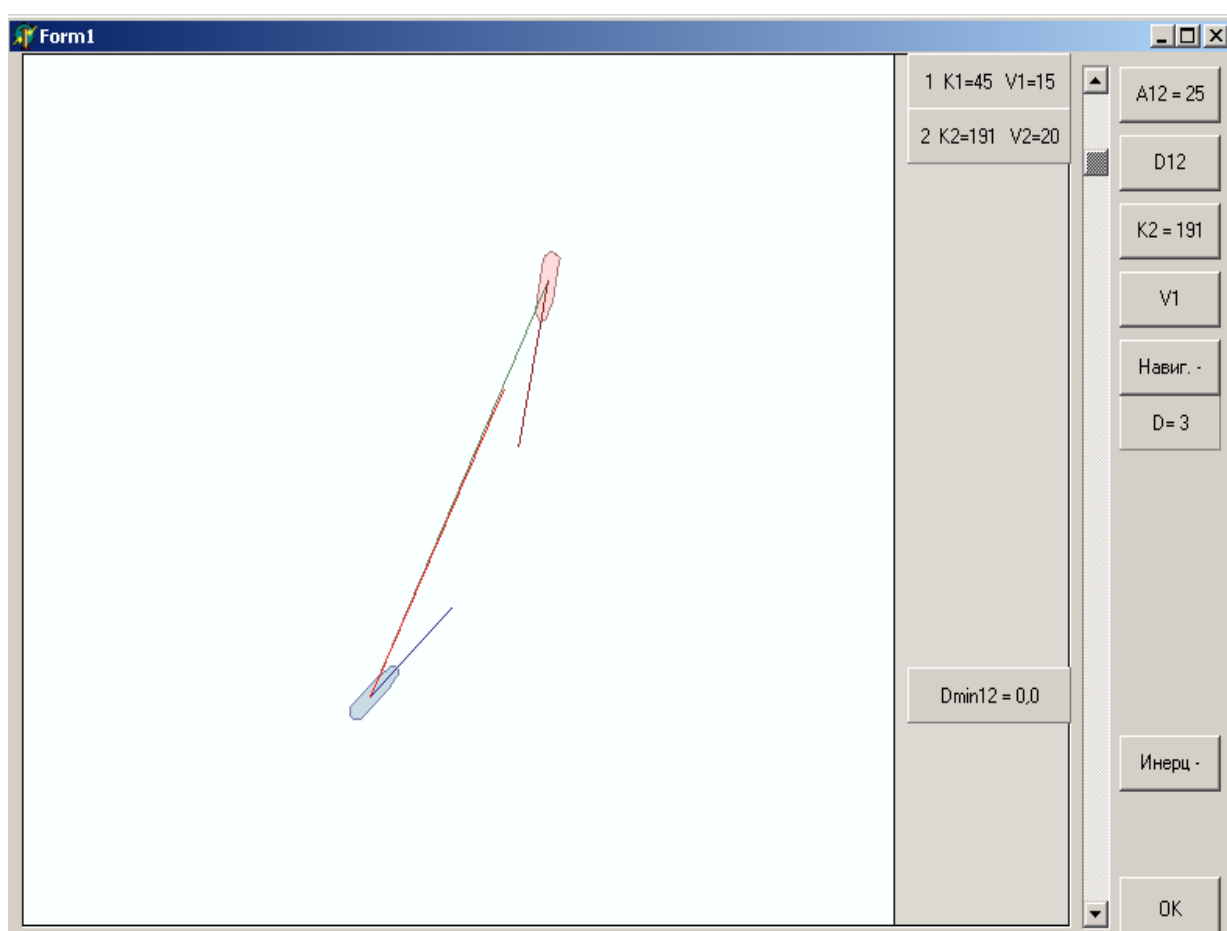


Рис. 5.31. Перша ситуація небезпечного зближення

У даній ситуації небезпечного зближення відсутні навігаційні небезпеки і не враховується інерційність суден при повороті. Значення прогнозованої дистанції найкоротшого зближення дорівнює 0,02 милі. Для вибору безпечно-

го маневру зміною курсу було сформовано область небезпечних курсів суден без урахування їх інерційності при повороті, яка представлена на рис. 5.32. Розходження розглядається ухиленням тільки другого судна,



Рис. 5.32. Область небезпечних курсів без урахування інерційності суден

причому його курс ухилення, як впливає з рис. 5.33, дорівнює $K_{2y}=224^\circ$. Для відтворення обраного маневру ухилення необхідно "клікнути" клавішу "OK", після чого виводиться зображення початкової ситуації небезпечного зближення, як показано на рис. 5. 34, і активізується кнопка "TIMER". За допомогою цієї клавіші проводиться відтворення маневру, якщо клавішу використовувати повторно, то процес відтворення буде зупинений. Після запуску відтворення маневру суду переміщаються зі своїми параметра-

ми руху. Перше судно прямує незмінними курсом і швидкістю, а друге судно, як показано на рис. 5.35, починає поворот вліво на курс ухилення 224° . Контроль вліво на курс ухилення 224° . Контроль параметрів процесу

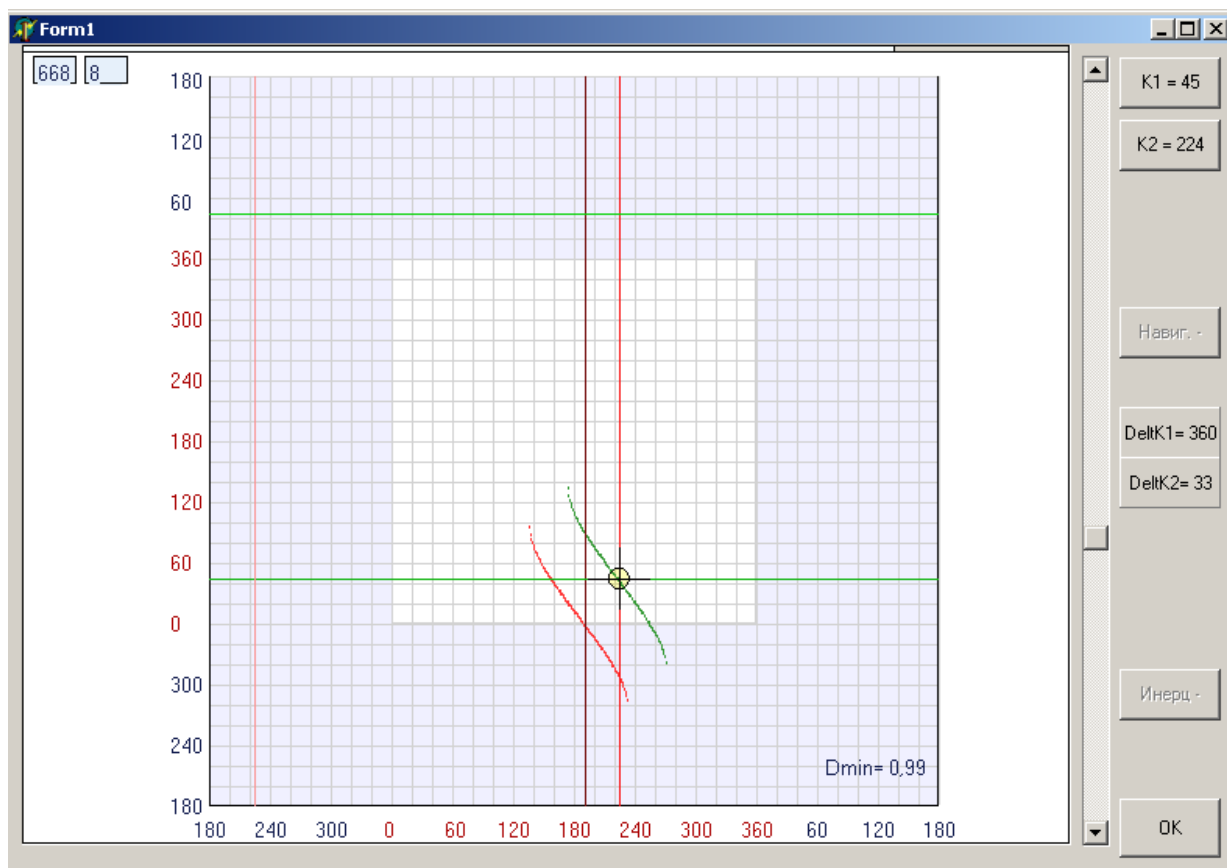


Рис. 5.33. Вибір курсу ухилення другого судна



Рис. 5.34. Початок відтворення маневру розходження

розходження здійснюється за допомогою чотирьох інформаційних панелей, на які виводяться поточні значення часу, дистанції між суднами, а також їх курси.

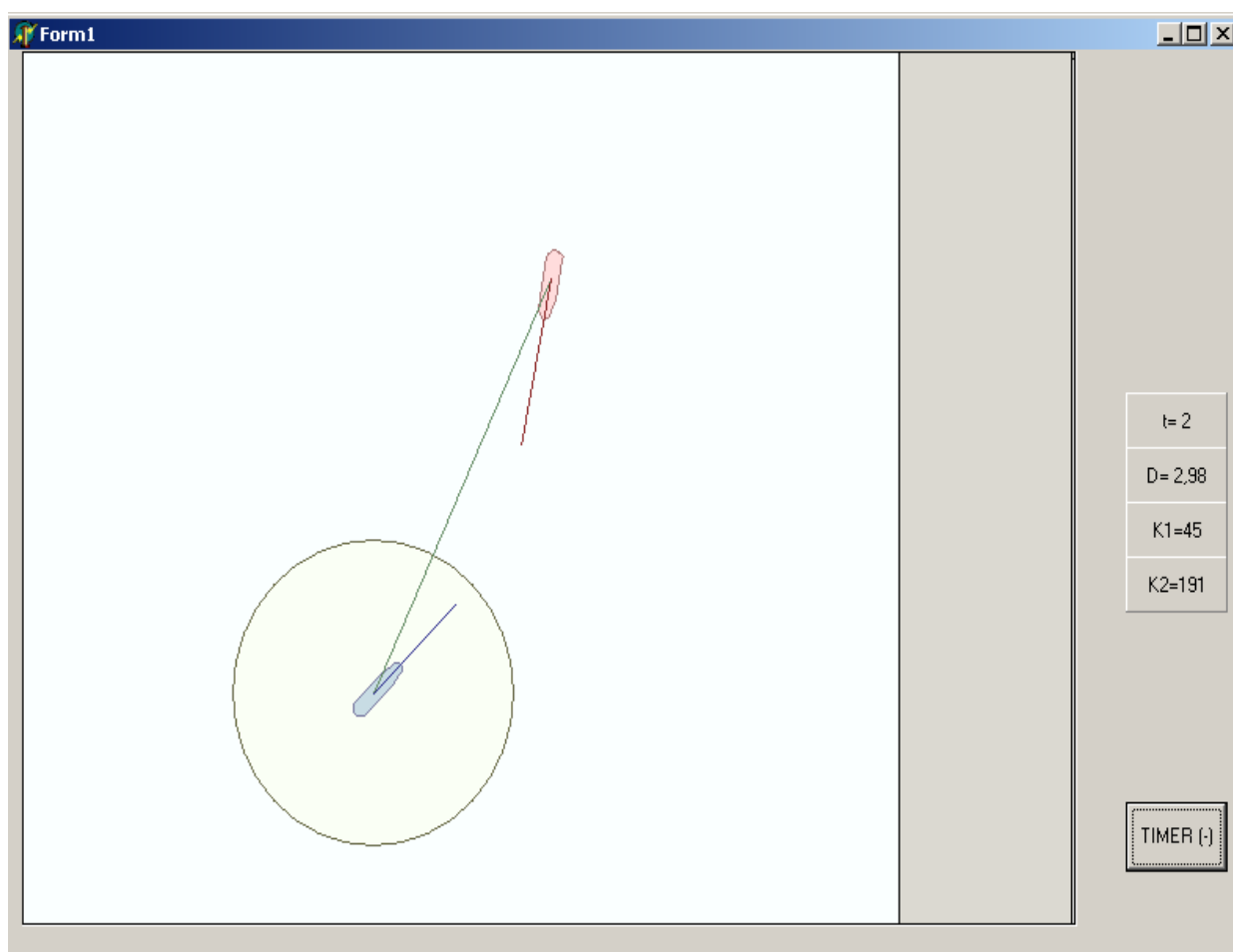
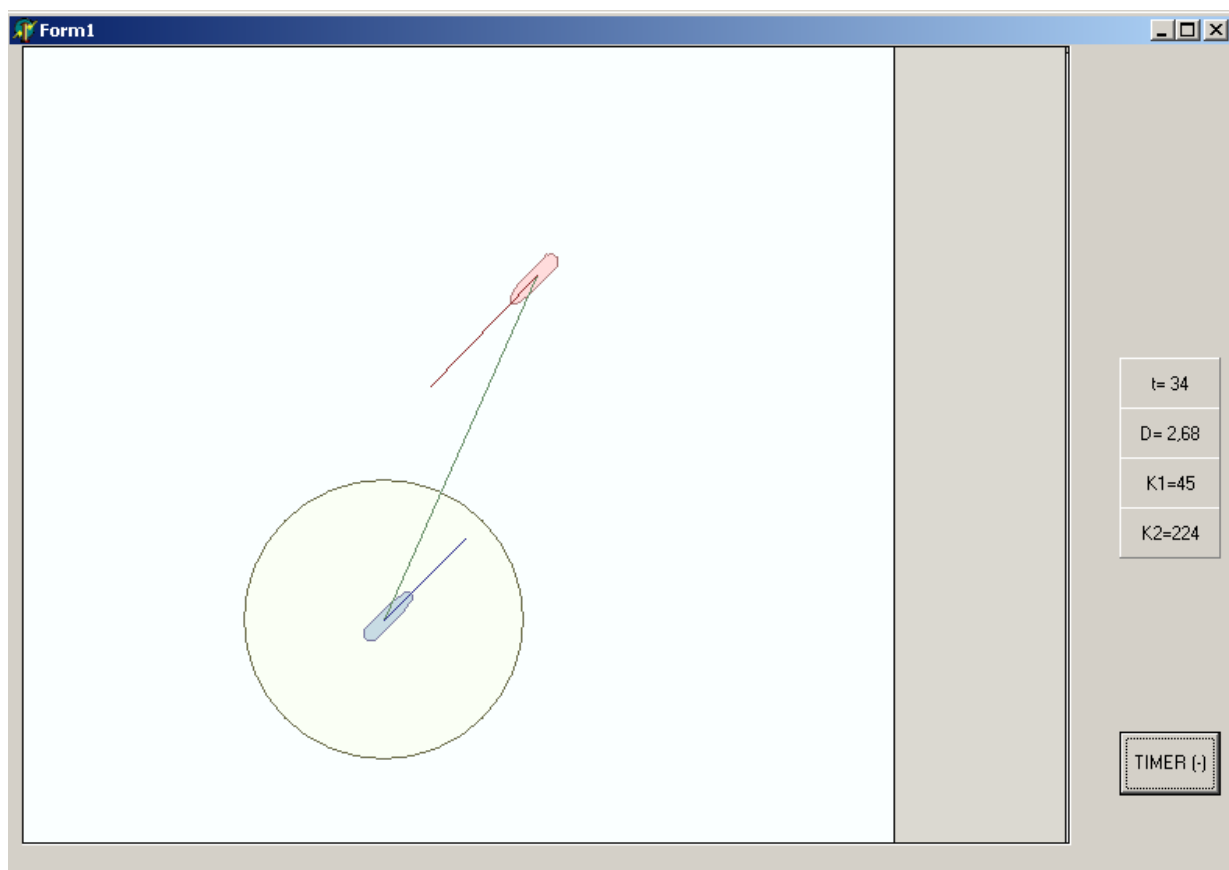
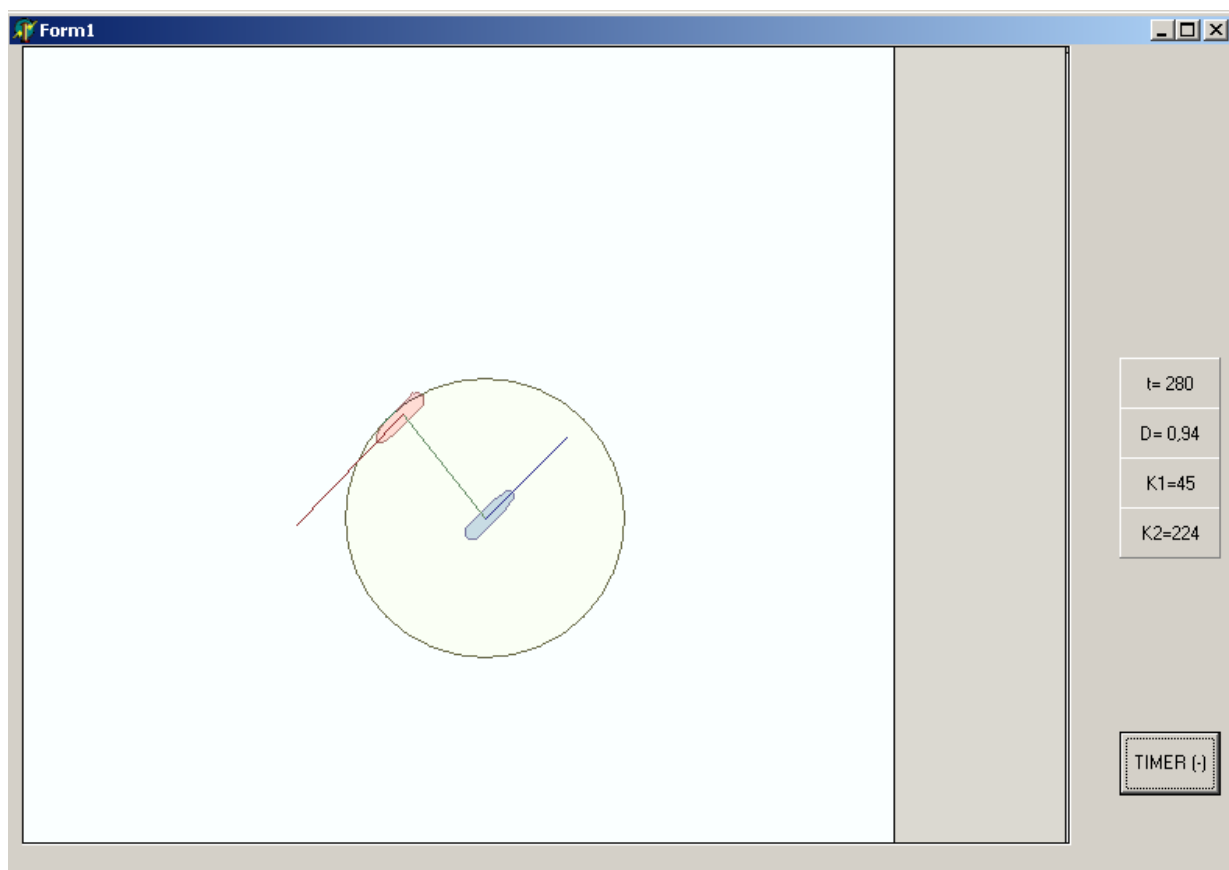


Рис. 5.35. Початок повороту другого судна

Поворот другого судна триває 32 с, а завершення повороту другого судна на 34 с процесу розходження показано на рис. 5.36. Причому значення дистанції в цей момент часу дорівнює 2,68 милі. У момент часу 280 с, як впливає з рис. 5.37, судна зближуються на дистанцію найкоротшого зближення, яка дорівнює 0,94 милі і менше на 0,06 милі, ніж гранично-допустима дистанція, що пояснюється відсутністю врахування інерційності судна при повороті. При включенні режиму обліку інерційності судна при повороті в тій же ситуації небезпечного зближення суден область небезпечних курсів приймає вид, що наведений на рис. 5.38.



5.36. Завершения поворота другим судном



5.37. Момент часу найкоротшого зближення суден

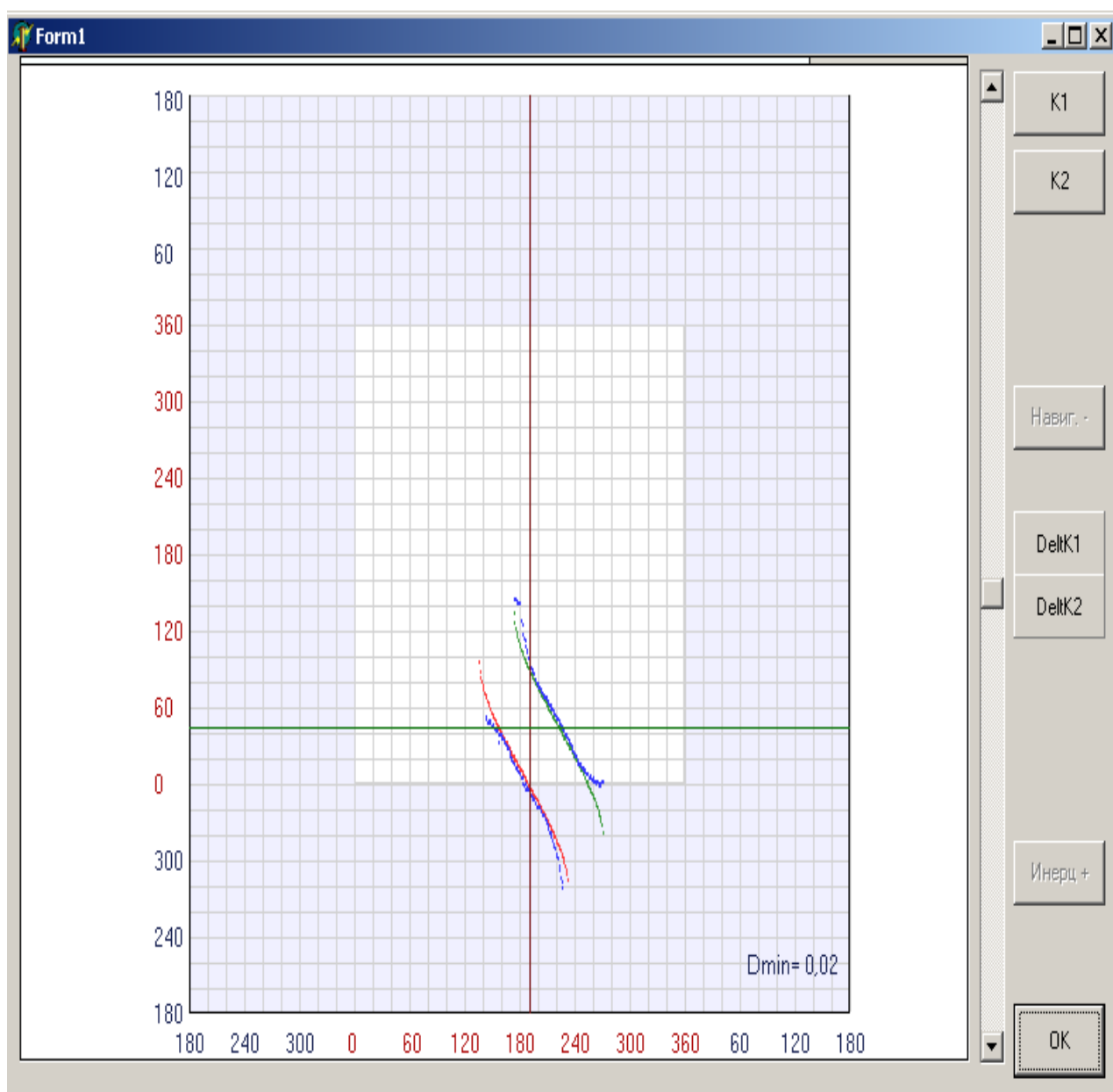


Рис. 5.38. Курс ухилення другого судна с урахуванням його інерційності

Вибір курсу ухилення другого судна для безпечного розходження за верхньою межею області небезпечних курсів з урахуванням його інерційності показано на рис. 5.38, з якого випливає, що курс ухилення другого судна становить $K_{2y}=228^\circ$, тобто на 4° більше курсу ухилення без урахування інерційності. При цьому перше судно, як привілейоване, прямує незмінним курсом, рівним 45° . На рис. 5.39 показано стан процесу розходження на 281 с,

коли досягається дистанція найкоротшого зближення, яка дорівнює 1,01 милі, тобто гранично-допустимої дистанції зближення.

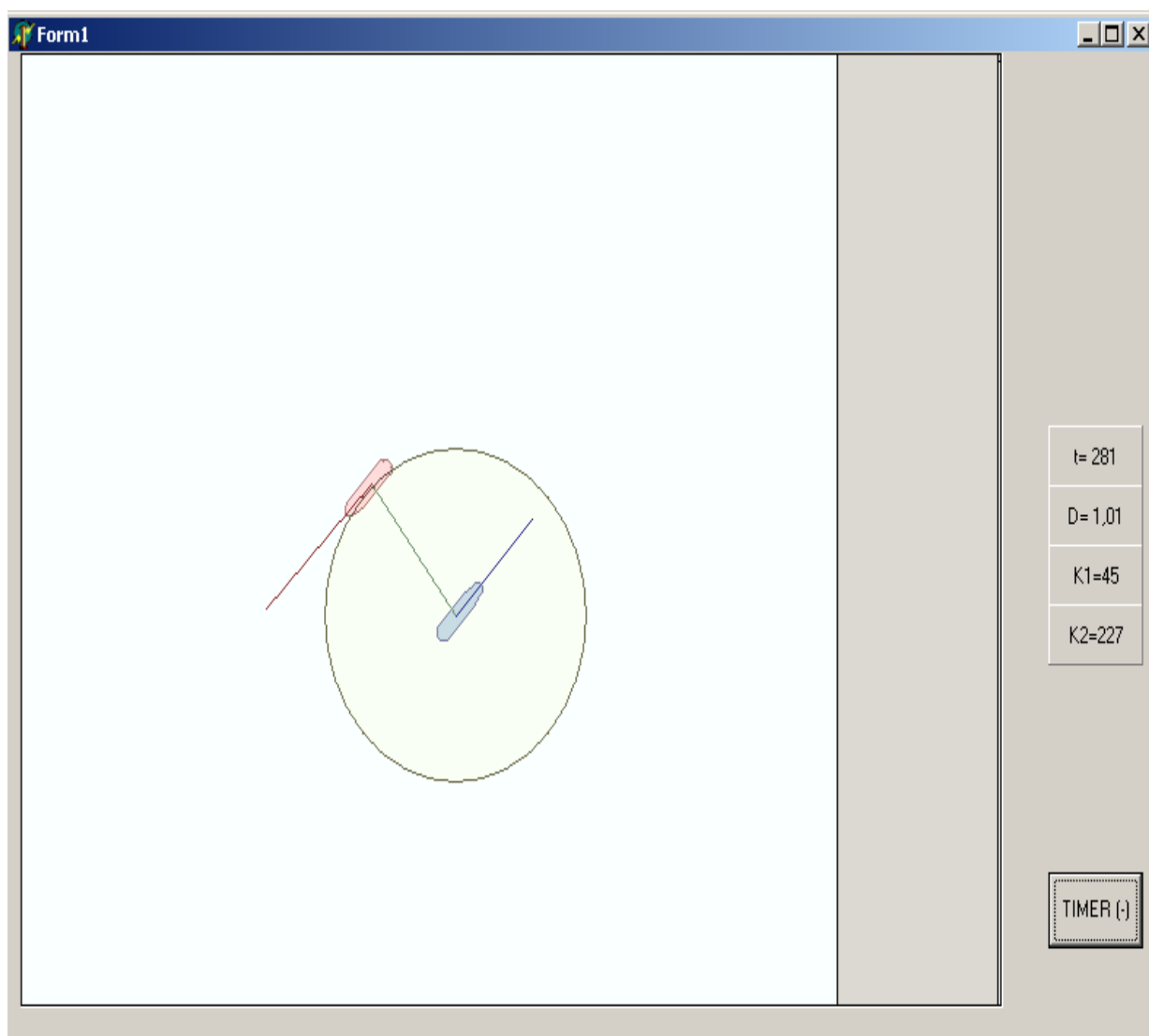


Рис. 5.39. Момент часу найкоротшого зближення з урахуванням інерційності

Розглянемо моделювання процесу розходження при наявності точкової навігаційної небезпеки, для чого згенеровано ситуацію небезпечного зближення, яка містить точкову навігаційну небезпеку. Параметри ситуації збли-

ження мають таке значення: пеленг $\alpha_{12}=67^\circ$, дистанція $D_{12}=3$ милі, параметри руху суден $K_1=21^\circ$, $K_2=285^\circ$, $V_1=15$ вузлів, $V_2=20$ вузлів. Точкова навігаційна небезпека характеризується пеленгом $\alpha_{nv}=34^\circ$ і дистанцією $D_{nv}=2,0$ милі. Прогнозована дистанція найкоротшого зближення $D_{min}=0,15$ милі. Дана ситуація небезпечного зближення суден показана на рис. 5.40.

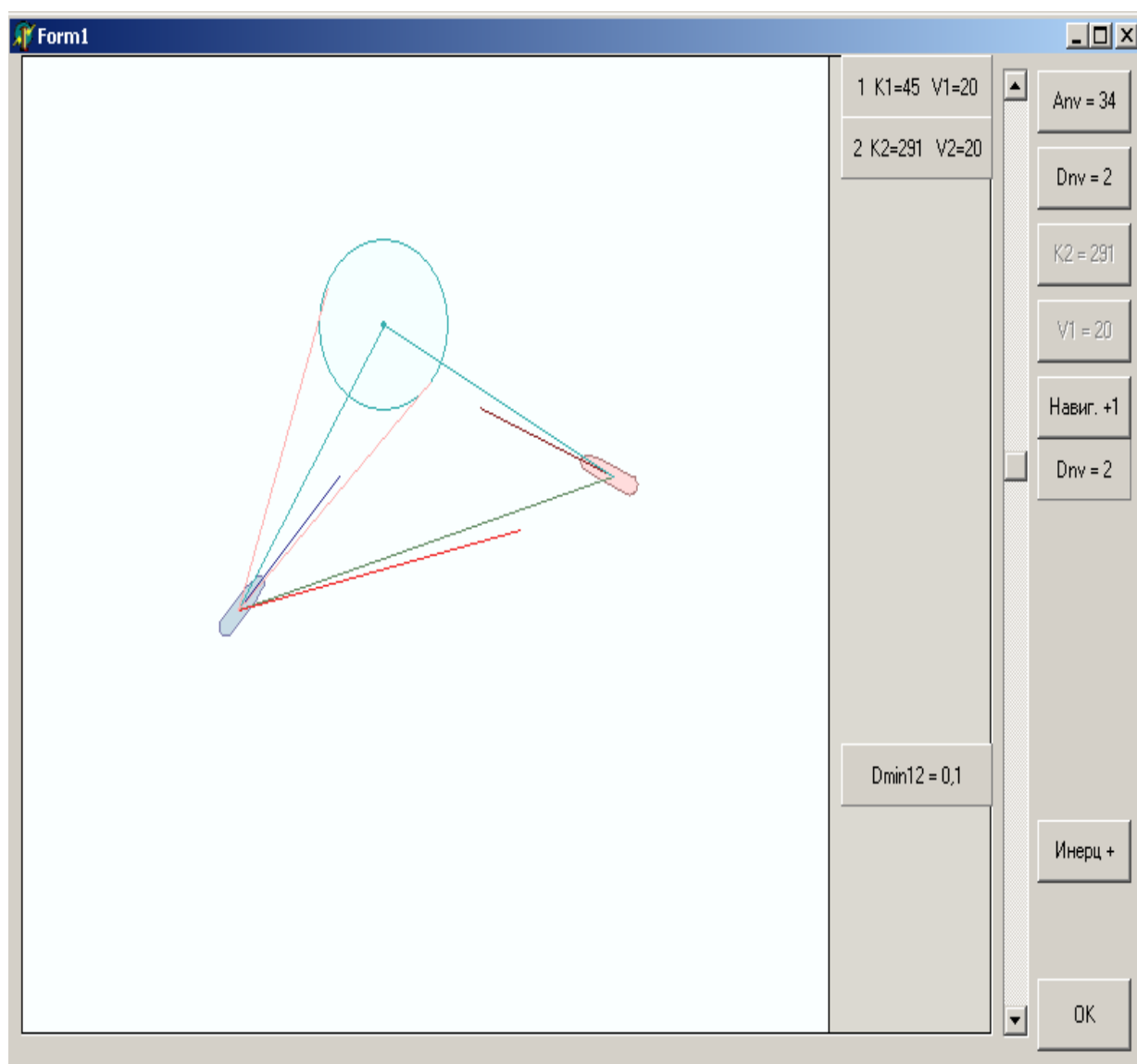


Рис. 5.40. Друга ситуація небезпечного зближення

Відповідна ситуації зближення область небезпечних курсів представлено на рис. 5.41, а вибір курсів ухилення суден з урахуванням обмеження на точкову навігаційну показано на рис. 5.42. Як видно з рисунка, курсом ухилення першого судна є верхня межа навігаційного обмеження і тому $K_{1y}=47^\circ$, а курс ухилення другого судна обраний з урахуванням безпеки

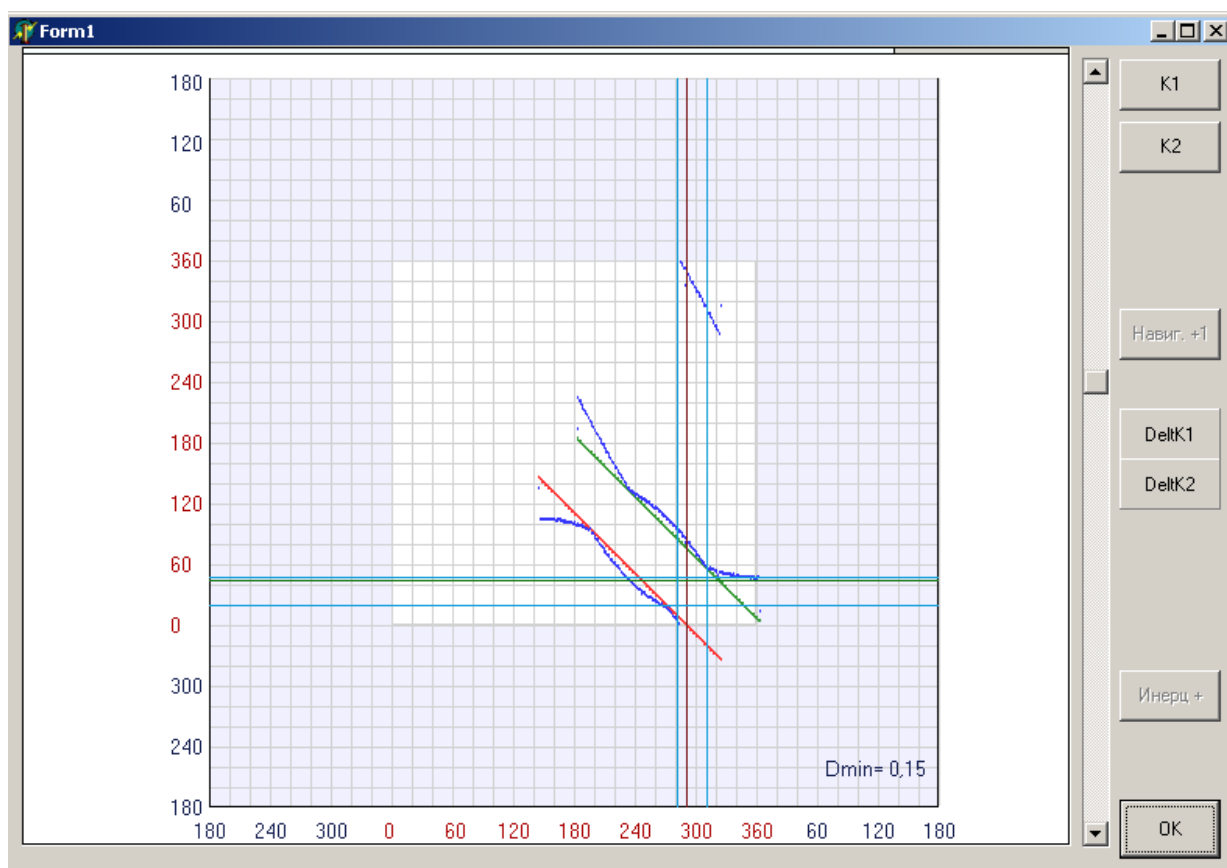


Рис. 5.41. Область небезпечних курсів і навігаційні обмеження

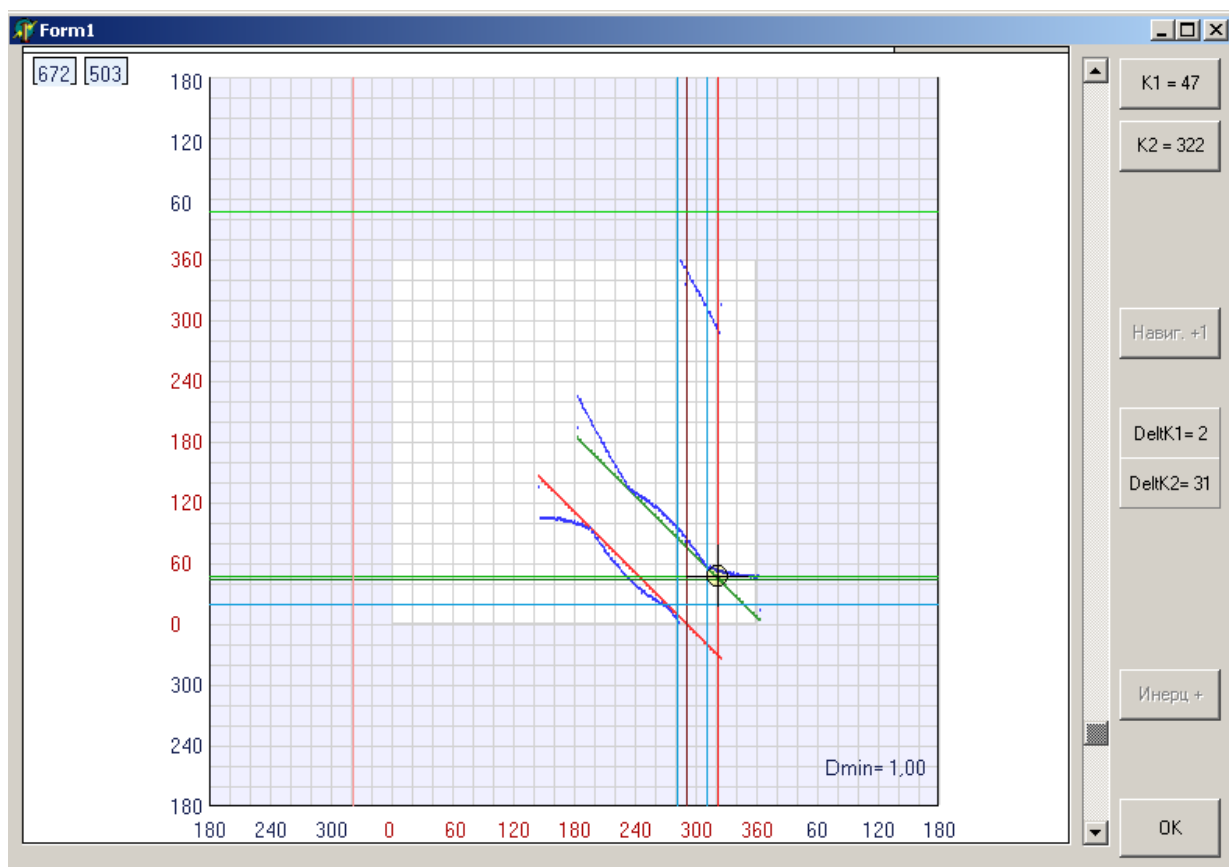


Рис. 5.42. Вибір безпечних курсів ухилення

розходження на верхній межі області небезпечних курсів і дорівнює $K_{2y} = 322^\circ$. Відтворення маневру з отриманими курсами ухилення починається з початкової ситуації, показаної на рис. 5.43, "кліканням" клавіші "TIMER".

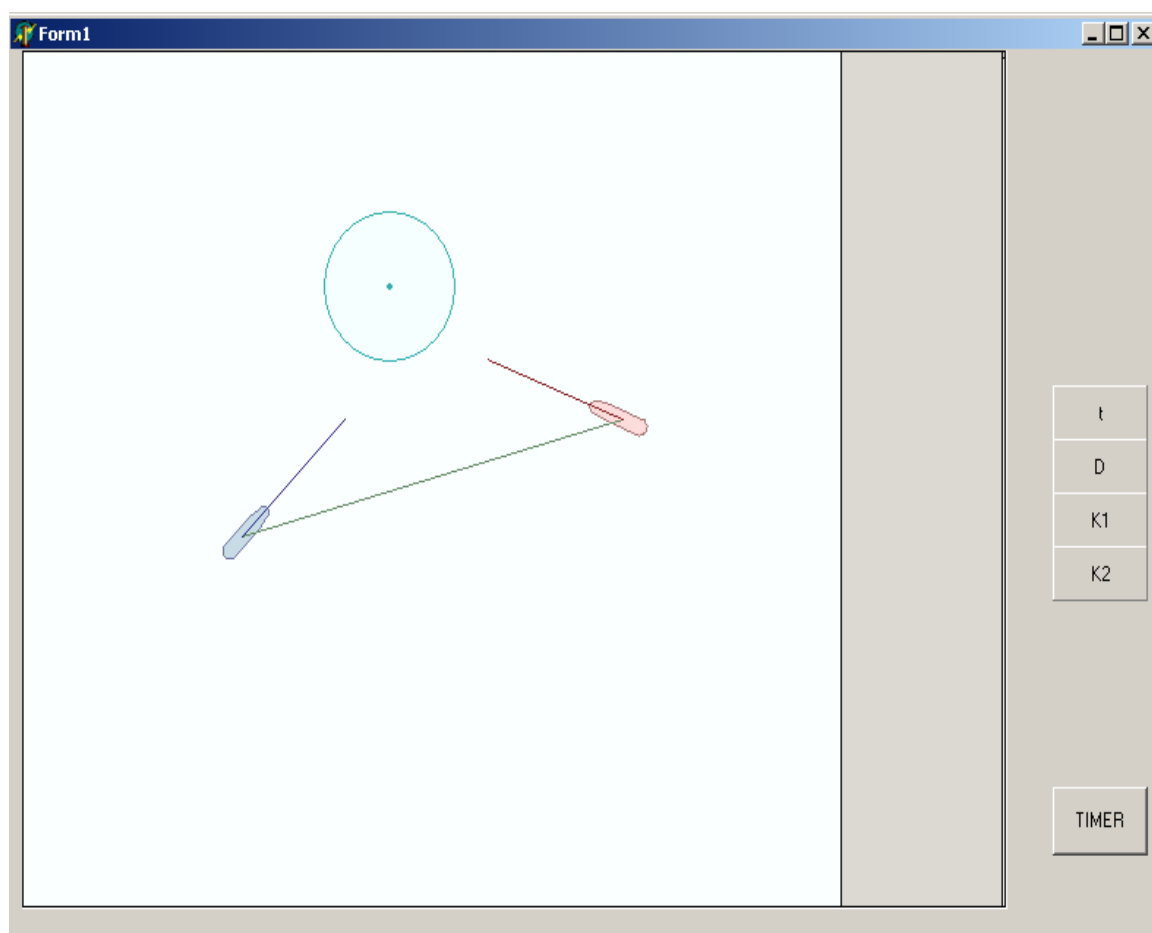


Рис. 5.43. Початок відтворення маневру розходження другої ситуації

На рис. 5.44 показані положення суден в момент часу початку повороту на курси ухилення. У момент часу 331 с, як показано на рис. 5.45, досягається найкоротше зближення суден на дистанції 1,00 милі, що дорівнює гранично-допустимій дистанції. При цьому перше судно безпечно пройшло повз точкової навігаційної небезпеки на заданій дистанції, а друге судно, безпечно розійшовшись з першим судном, також безпечно пройшло повз точкової навігаційної небезпеки з запасом дистанції.

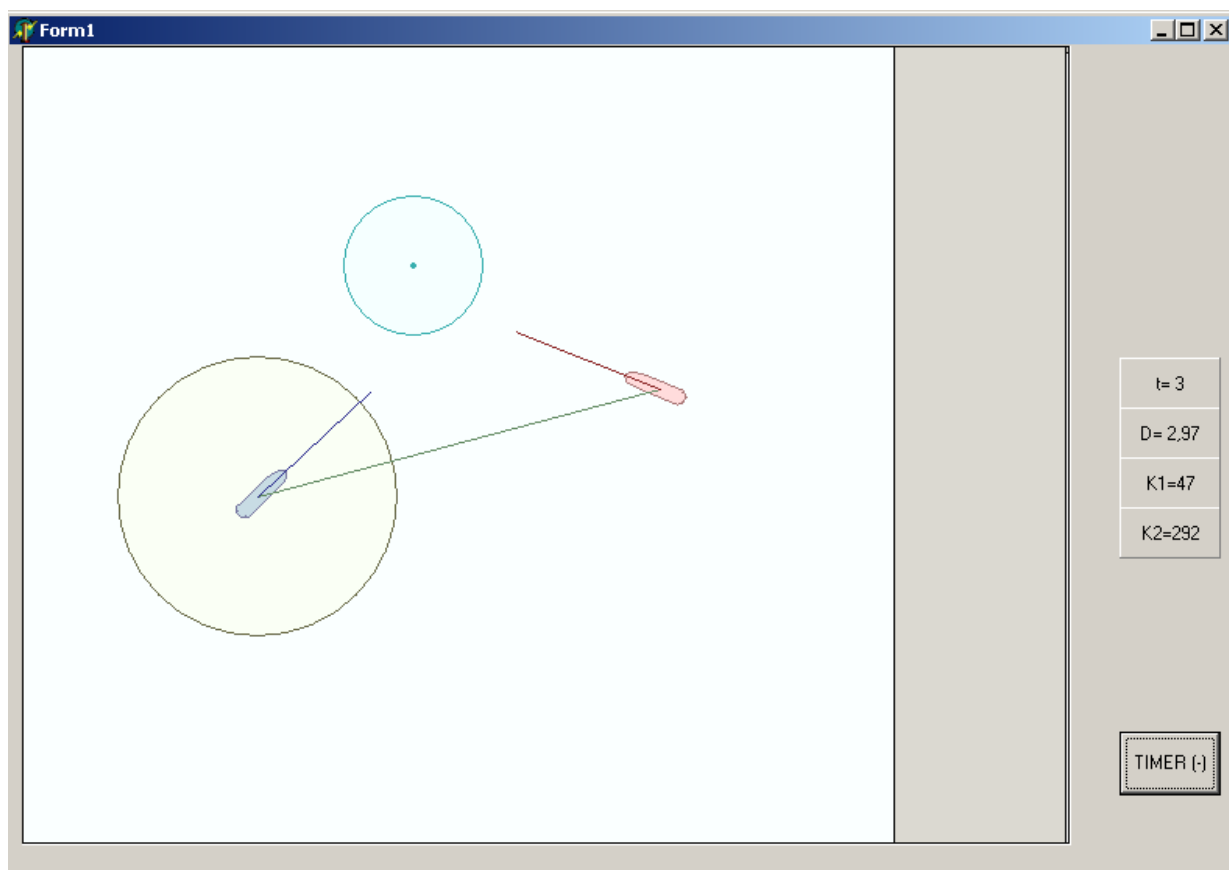


Рис. 5.44. Початок повороту суден на курси ухилення

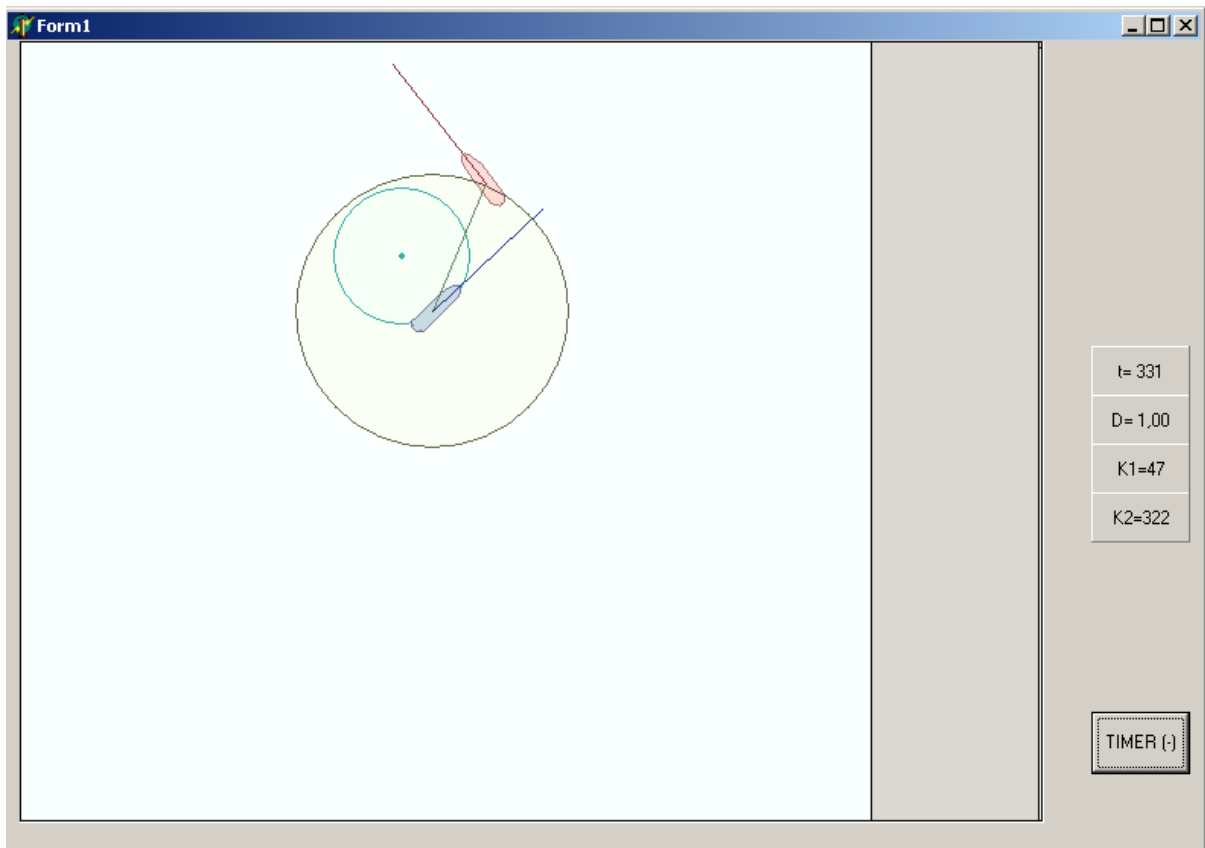


Рис. 5.45. Найкоротше зближення суден

Ситуація небезпечного зближення суден при наявності лінійної розподіленої навігаційної небезпеки показано на рис. 5.46, причому параметри ситуації такі: пеленг $\alpha_{12}=81^\circ$, дистанція $D_{12}=3$ милі, параметри руху суден $K_1=45^\circ$, $K_2=315^\circ$, $V_1=25$ вузлів, $V_2=18$ вузлів. Лінійна розподілена навігаційна небезпека характеризується пеленгом $\alpha_{nv1}=24^\circ$ і дистанцією $D_{nv1}=1,7$ милі на початкову точку, а також пеленгом $\alpha_{nv2}=56^\circ$ і дистанцією $D_{nv2}=3,1$ милі на кінцеву точку лінійної розподіленої навігаційної небезпеки.

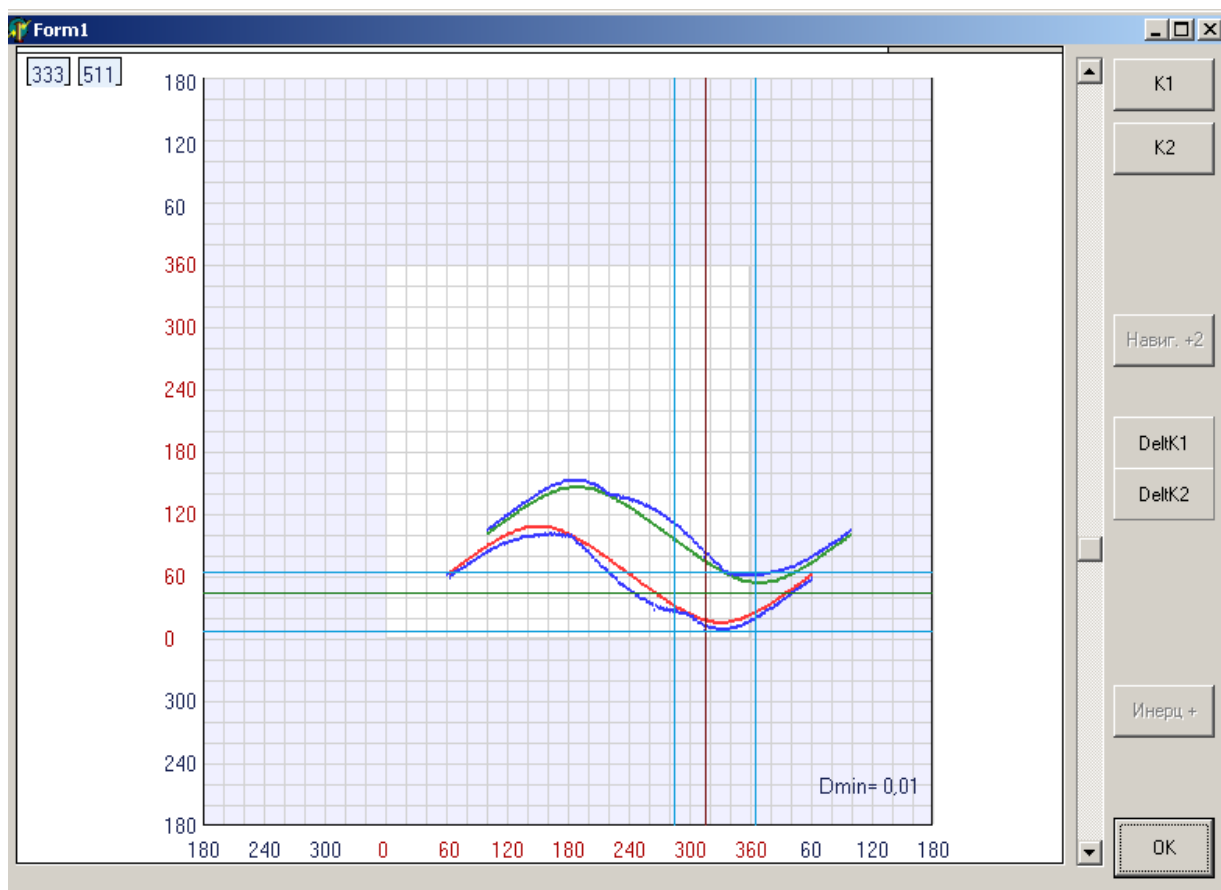


Рис. 5.47. Область небезпечних курсів і навігаційних обмежень

В якості курсів ухилення доцільно вибрати верхні межі навігаційних обмежень, як показано на рис. 5.48, тому $K_{1y}=65^\circ$ і $K_{2y}=6^\circ$. На 5.49 показано початкову позицію процесу розходження перед відтворенням маневру.

На рис. 5.50 показано стан процесу розходження в момент часу найкоротшого зближення другого судна з навігаційною небезпекою, причому друге судно проходить безпечно на гранично-допустимій дистанції відносно кінцевої точки небезпеки.

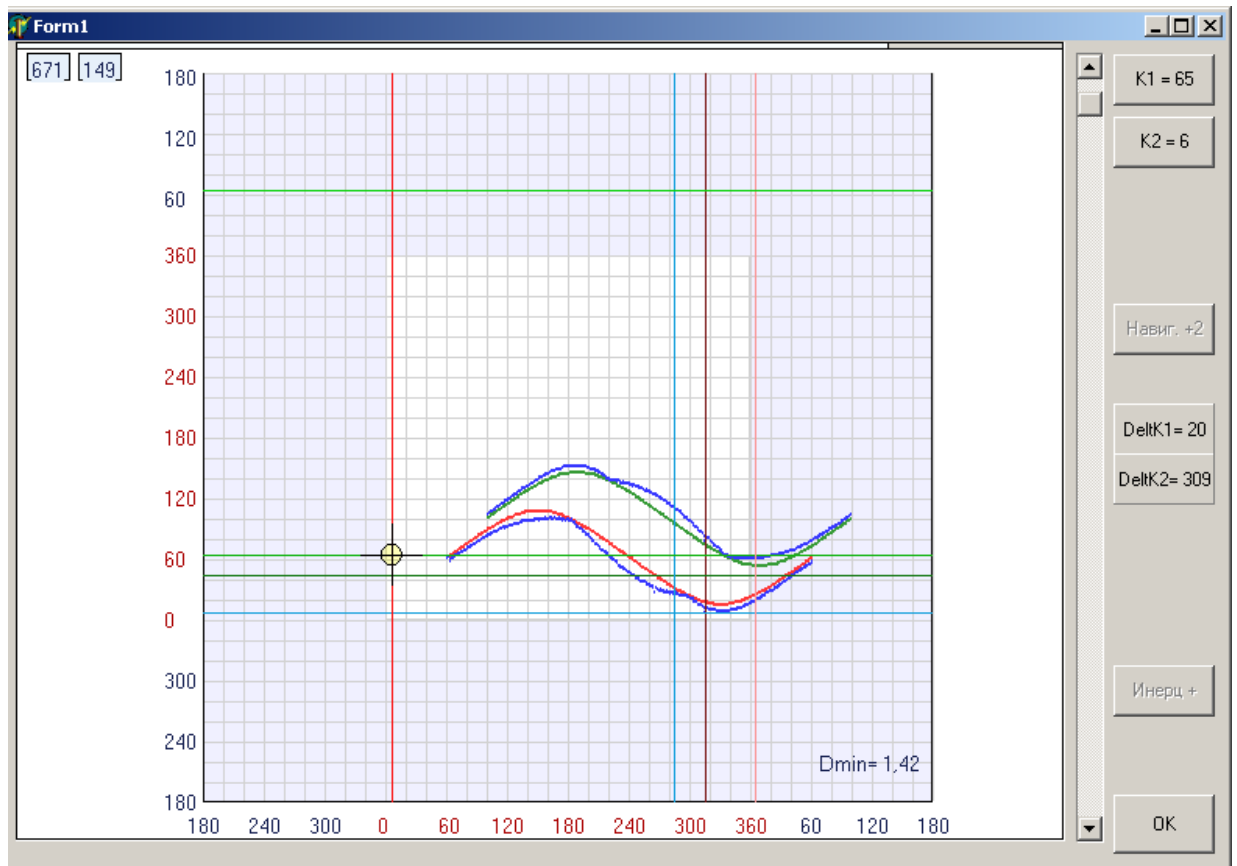


Рис. 5.48. Вибір курсів ухилення при лінійній небезпеці

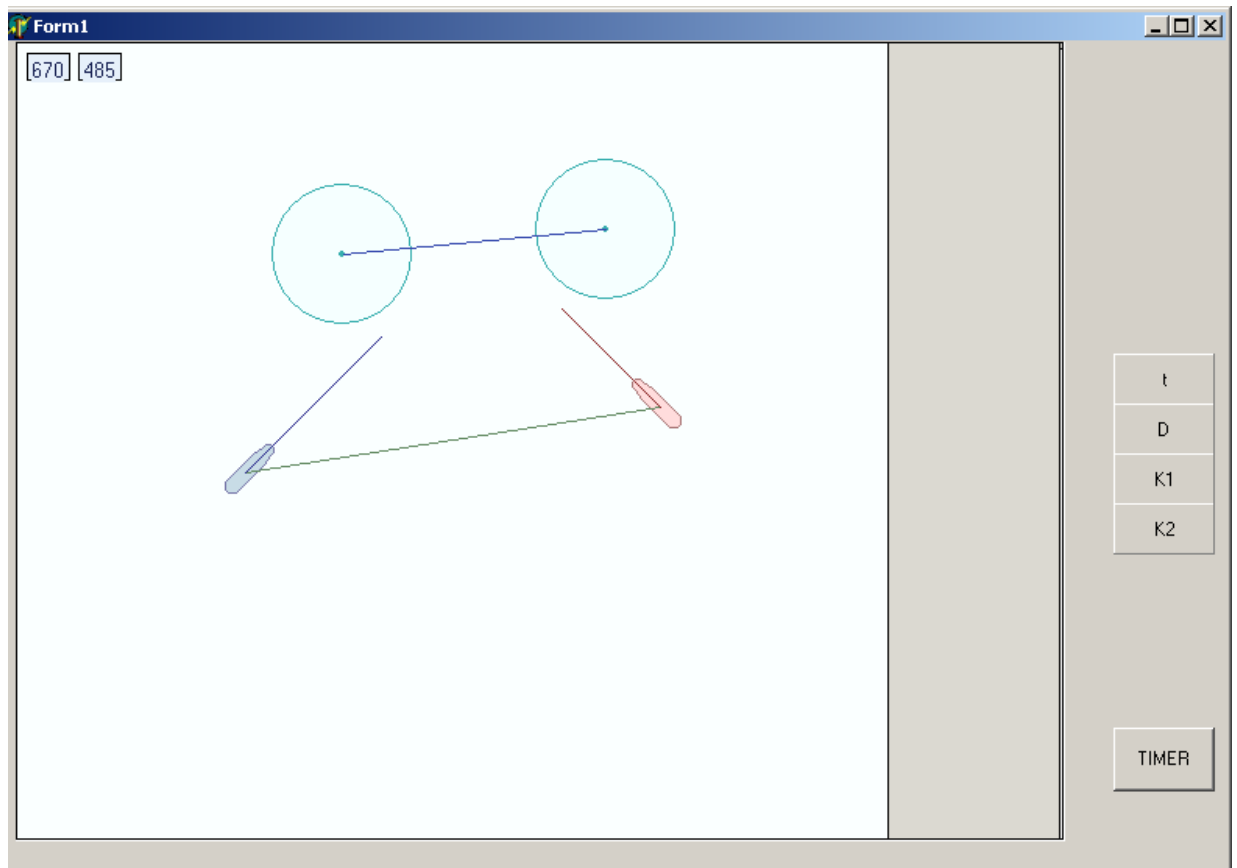


Рис. 5.49. Початкова позиція процесу розходження

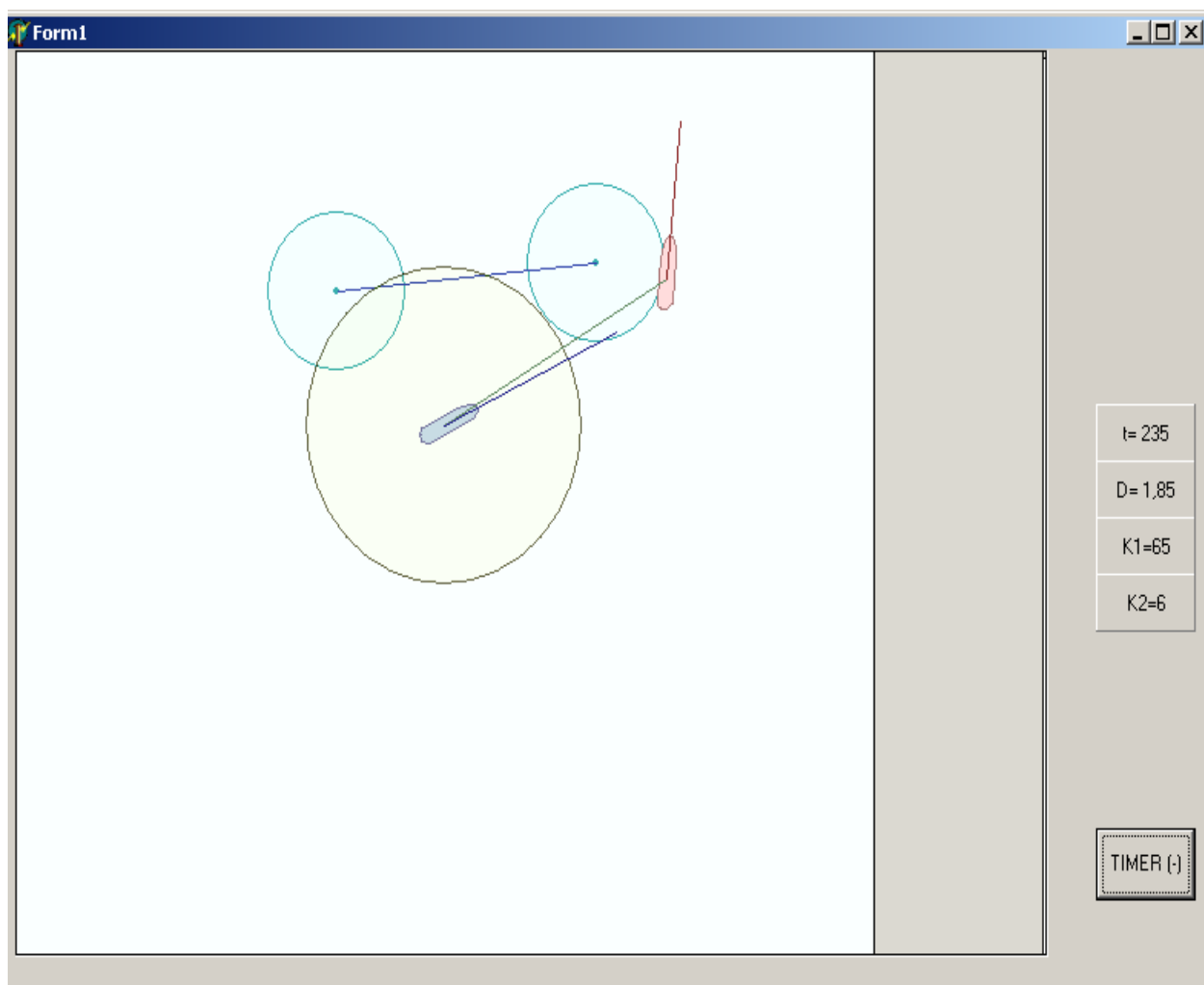


Рис. 5.50. Найкоротше зближення другого судна з небезпекою

Як випливає з рис. 5.51, перше судно також безпечно проходить на заданій гранично-допустимій дистанції кінцеву точку лінійно розподіленої навігаційної небезпеки. Звертаємо увагу на ту обставину, що дистанція найкоротшого зближення між суднами набагато більше обраної гранично-допустимої дистанції зближення суден, прийнятої в даному прикладі 1 милі.

Таким чином, імітаційною програмою підтверджено коректність запропонованого способу вибору курсів ухилення суден за допомогою області небезпечних курсів, сформованої з урахуванням інерційності суден і навігаційних небезпек різних типів.

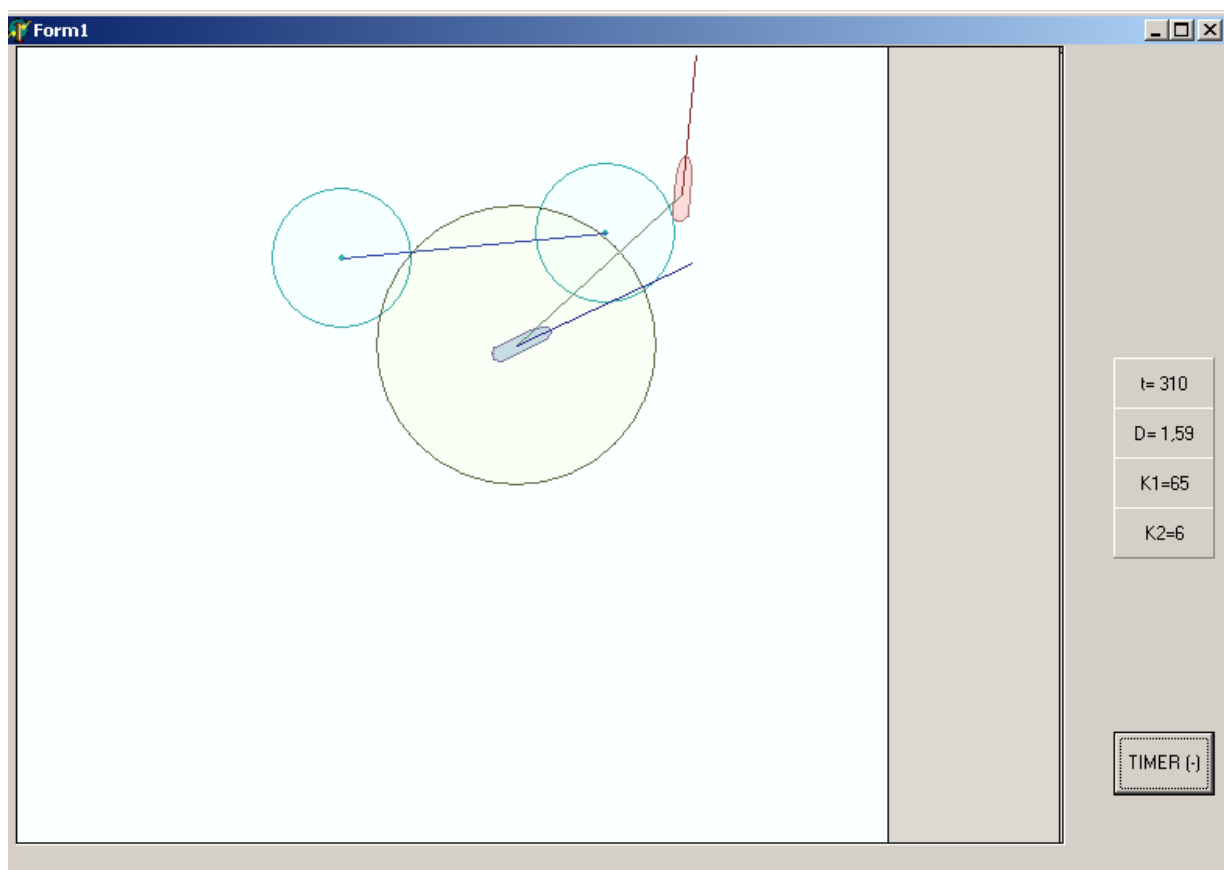


Рис. 5.51. Безпечне проходження першим судном небезпеки

5.3. Висновки за п'ятим розділом.

У розділі наведено опис імітаційної комп'ютерної програми для перевірки коректності теоретичних результатів дисертаційної роботи, а також представлено результати імітаційного моделювання процесів розходження суден в різних ситуаціях небезпечного зближення.

Показано, що імітаційна програма містить два основних модуля: модуль генерування початкової ситуації небезпечного зближення суден з наявністю навігаційної небезпеки різного типу і вибір безпечних курсів ухилення в згенерованій ситуації, а також модуль відтворення обраного маневру розходження зміною курсів.

За допомогою першого модуля формується ситуація небезпечного зближення суден, причому є можливість в початкову ситуацію ввести точкову або лінійну розподілену навігаційну небезпеку. Для згенерованої початкової ситуації небезпечного зближення програмою формується область небезпечних курсів з урахуванням інерційності суден при повороті, а при наявності навігаційної небезпеки відображаються навігаційні обмеження на курси ухилення суден. Після вибору оператором безпечних курсів ухилення суден використовується другий модуль для відтворення маневру розходження.

Відтворення маневру є анімаційним відображенням процесу розходження і виведенням поточних значень основних його параметрів. Аналізуючи процес розходження, робиться висновок про коректність обраних маневрів ухилення суден. Представлені в роботі результати відтворення маневрів ряду ситуацій небезпечного зближення показують коректність запропонованого способу вибору курсів ухилення суден з урахуванням їх інерційності і наявної навігаційної небезпеки.

ВИСНОВКИ

1. Оцінка стану питання. Проблема підвищення безаварійності судноводіння являється однією з найважливіших проблем безпеки мореплавання, так як її успішне рішення веде до охорони людського життя на морі, зменшення збитків майну і виробничим процесам, зниження шкоди навколишньому середовищу.

Плавання морських суден в умовах обмеженого простору ускладнюють інтенсивне судноплавство та навігаційні небезпеки, які створюють передумови для виникнення аварійних ситуацій. В стислих районах плавання навігаційна ситуація підлягає швидким змінам, тому необхідна розробка сучасних простих в використанні методів оцінки небезпеки зближення та вибору маневру розходження з використанням комп'ютерних інформаційних технологій. Тому розробка сучасних способів управління процесом розходження суден, що небезпечно зближуються, чому присвячена дана робота, є актуальним науковим напрямом.

2. Формулювання вирішеної наукової задачі, її значення для науки і практики. В результаті вирішення головної наукової задачі отримано новий метод вибору оптимального маневру розходження суден зміною курсів, що реалізований в комп'ютерному модулі із застосуванням області небезпечних значень курсів з урахуванням динаміки судна та навігаційних перешкод.

При вирішенні головної задачі, в роботі отримані рішення трьох складових задач у вигляді наукових результатів, що містять наукову новизну:

- вперше розроблено динамічну послідовність руху пари суден на повороті при формуванні області небезпечних значень їх курсів;
- отримав подальший розвиток алгоритм визначення меж області небезпечних значень курсів суден з урахуванням навігаційної перешкоди;

— удосконалено процес візуального відображення області небезпечних значень курсів суден та вибору маневру безпечного розходження під час руху при наявності навігаційних перешкод.

Практична значимість роботи визначається тим, що її основні результати можуть бути впроваджені на судна для попередження зіткнень, а також використані розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для зовнішнього управління суднами.

3. Висновки і рекомендації щодо наукового та практичного використання отриманих результатів. Основні теоретичні і практичні результати, отримані в дисертації, можуть бути використані в процесі навчання і підвищення кваліфікації судноводіїв.

4. Якісні та кількісні показники отриманих результатів. Якісним показником результатів дисертаційної роботи є можливість оперативного і коректного вибору маневру розходження судна за допомогою запропонованих способів використання областей неприпустимих значень курсів суден, які мають високу ефективність.

5. Обґрунтування достовірності отриманих результатів.

Достовірність результатів роботи підтверджуються коректною розробкою і застосуванням математичних моделей, а також імітаційним моделюванням, виконаним за допомогою розроблених комп'ютерних програм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Цаллагов Х.- Б.Н. Аналитические методы определения безопасных курсов и скоростей судов / Цаллагов Х.- Б.Н. // Теоретические вопросы построения АСУ крупнотоннажными транспортными судами. - М.: Наука, 1978. - С. 83-93.
3. Георгизон Е. Б. Сравнительный анализ алгоритмов расхождения судов / Георгизон Е. Б., Цаллагов Х.-Б. Н.// Теоретические вопросы построения АСУ крупнотоннажными транспортными судами. - М.: Наука, 1978. - С. 93-101.
4. Цаллагов Х.-Б.Н. Безопасное расхождение судов при централизованном автоматизированном управлении / Цаллагов Х.-Б.Н.// Задачи автоматизации управления движением судов в районах интенсивного судоходства. - М.: Ин-т Проблем Управления, 1983. - С. 29-39.
5. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем/ Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1975. - 240 с.
6. Павлов В.В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления/ Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1971. - 272 с.
7. Шепетуха Ю. М. К вопросу синтеза эргатической системы принятия решений о маневре безопасного расхождения судов / Шепетуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1989. - № 84. - С. 43-45.
8. Павлов В.В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов/ Павлов В.В., Сеньшин Н.И. // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. - № 68. - С. 43-45.
9. Положенцев И.А. Двухступенчатая система предотвращения столкновения судов/ Положенцев И.А. // Автоматика. – 1981. - № 3. - С. 73-76.

10. Положенцев И.А. Эргатическая дифференциально-игровая система предупреждения столкновения судов/ Положенцев И.А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1980. - № 50. - С. 38-41.

11. Павлов В.В. Проблемы построения многоцелевой эргатической системы предупреждения столкновений морских судов/ Павлов В.В., Баранов В.Л., Положенцев И.А. // Автоматика. – 1980. - № 2. - С. 73-76.

12. Богачук Ю.П. Эргатическая дифференциально – игровая система предотвращения столкновений судов/ Богачук Ю.П., Положенцев М.А. // Дискретные и эргатические системы управления. - Киев: Ин-т кибернетики, 1983. – С. 98-105.

13. Богачук Ю.П. Эргатическая система управления групповым движением судов/ Богачук Ю.П., Положенцев И.А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 20-23.

14. Шепетуха Ю.М. Некоторые вопросы постановки задачи синтеза систем управления движением судна в условиях конфликта/ Шепетуха Ю.М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 44-48.

15. Шепетуха Ю. М. Применение комбинированного маневра в эргатических системах разрешения навигационного конфликта / Шепетуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1985. - № 68. - С. 45-48.

16. Положенцев М. А. Применение двухэлементных стратегий расхождения в эргатических системах предупреждения столкновений судов / Положенцев М. А., Шепетуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1987. - №76. - С. 19-21.

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 / Павлов В.В., Шепетуха Ю. М.: Препр. /АН Украины. Ин-т кибернетики; № 52. – К.: 1985. - 24 с.

19. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов/ Куликов А. М., Поддубный В. В. // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.
20. Поддубный В.В. Метод возможных направлений в задачах безопасного расхождения судов/ Поддубный В.В., Куликов А.А. – М., 1987. – 21 с. – Деп. в ВИНТИ.
21. Фрейдзон И.Р. Моделирование корабельных систем управления/ Фрейдзон И.Р. – Л.: Судостроение, 1975. 232 с.
22. Кудряшов В.Е. Математическая модель процесса расхождения нескольких управляемых объектов/ Кудряшов В.Е. // Известия ЛЭТИ. - 1976.- № 206.- С. 15-19.
23. 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» / Кудряшов В.Е. – Ленинград, 1976. – 23 с.
24. Кудряшов В.Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами/ Кудряшов В.Е. // Судостроение. – 1978. - № 5. – С. 35-40.
25. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
26. Сафин И. В. Условия существования безопасных маневров расхождения / Сафин И. В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 158 – 163.
27. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / Сафин И.В. // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.
28. Сафин И.В. Расчет граничных значений параметров множества допустимых маневров расхождения / Сафин И.В. // Судовождение. - №4. - 2002. – С. 95 – 100.
29. Wawruch R. Study Reliability of the Information About the CPA and TCPA Indicated by the Ship's AIS/ Wawruch R// TransNav, the International Jour-

nal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 3, 2016.- pp. 417-424.

30. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при расчете момента времени завершения маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. - № 5. - 2002. – С. 13 – 21.

31. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2002. - №4. – С. 32- 36.

32. Бурмака И.А. Расчет длительности поворота судна при расхождении / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств. - 2002. - №7. - С. 3- 6.

33. Бурмака И.А. Применение численных методов для расчета времени начала уклонения судна при расхождении / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2003. - № 6. – С. 27-31.

34. Бурмака И.А. Безопасное расхождение судов с учетом их инерционности: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16 «Судовождение» / Бурмака И.А.– Одесса, 2004. – 22 с.

35. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2005. - № 9. - С. 7-13.

36. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.

37. Rutkowski G.: Determining Ship's Safe Speed and Best Possible Speed for Sea Voyage Legs. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 3, , 2016, pp. 425-430.

38. Сафин И.В. Анализ результатов имитационного моделирования процесса расхождения судов / Сафин И.В. // Судовождение. - №6 - 2003. – С. 122-129.

39. Imazu H.: Evaluation Method of Collision Risk by Using True Motion. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 1, pp. 65-70, 2017.

40. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015.-312 с.

41. Wang T.F., Yan X.P., Wang Y., Wu Q.: Ship Domain Model for Multi-ship Collision Avoidance Decision-making with COLREGs Based on Artificial Potential Field. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 1, pp. 85-92, 2017.

42. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №6. – С. 103-107.

43. Петриченко Е.А. Учет линейной навигационной опасности при расхождении судов / Петриченко Е.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2003. – №8. – С. 72-76.

44. Петриченко Е.А. Описание навигационных опасностей в задаче расхождения судов / Петриченко Е.А. // Судовождение. - 2002. - №5. – С. 89- 95.

45. Pietrzykowski Z., Magaj J.: Ship Domain as a Safety Criterion in a Precautionary Area of Traffic Separation Scheme. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 1, pp. 93-98, 2017.

46. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.

47. Бурмака А.И. Разработка стратегии расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 20. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 – С. 32-35.

48. Бурмака А.И. Учет угловой скорости судна при расчете параметров маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения/ Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 21. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 - С. 38-41.

49. Wielgosz M.: Ship Domain in Open Sea Areas and Restricted Waters: an Analysis of Influence of the Available Maneuvering Area. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 1, 2017, pp. 99-104.

50. Kim D. Ship Collision Avoidance by Distributed Tabu Search/ Kim D., Hirayama K., Okimoto T. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 1, 2015, page 23-29.

51. Волков А.Н. Формирование безопасной области в судовых системах навигационной информации / Волков А.Н. // Проблемы техники: Научно-производственный журнал. - 2013. № 4. – С 52 - 56.

52. Волков А.Н. Отображение зоны безопасности судна на электронной карте // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 23. – Одесса: «ИздатИнформ», 2013, – С 40 - 45.

53. Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea/ Lisowski J. // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety. - 2005. – Gdańsk. – P. 71-78.

54. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation/ Lisowski J. // Advances in Safety and Reliability. – 2005. - Vol. 2. - London-Singapore, Balkema Publishers. – P. 1285-1292.

55. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system/ Lisowski J. // The Archives of Transport. - 2005. - No 3-4, Vol. XVII. – P. 133-147.

56. Якушев, А.О. Зависимость размеров судовой безопасной области от плотности распределения вероятностей позиционной погрешностей / А.О.

Якушев // Водный транспорт. – 2014. - №2 (20).– С. 84 – 88.

57. Якушев, А.О. Выбор формы безопасной области, обеспечивающей минимальное отклонение судна при расхождении / А.О. Якушев, Э.Н. Пятаков // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – № 21. – С. 77 – 81.

58. Fukuda G., Shoji R.: Development of Analytical Method for Finding the High Risk Collision Areas. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 3, 2017, pp. 531-536.

59. 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.

60. Xu X. Modeling of Ship Collision Risk Index Based on Complex Plane and Its Realization/ Xu X., Geng X., Wen Y.Q.// TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 2, 2016, page 251-256.

61. 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.

62. Пятаков Э. Н. Синтез системы бинарной координации при расхождении судов/ Пятаков Э. Н., Копанский С. В., Волков Е.Л. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург. – 2016. – выпуск 4 (38). – С. 23 - 28.

63. Пятаков Э. Н. Формирование системы бинарной координации судов с учетом закона необходимого разнообразия Эшби /Пятаков Э. Н.// Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22. – С. 75 – 78.

64. Пятаков Э.Н. Зависимость структуры стратегии расхождения судов от системы бинарной координации их взаимодействия / Пятаков Э.Н. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 39-44.

65. J. Lisowski. 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.

66. 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.

67. Lisowski J. Safety of navigation based – mathematical models of game ship control/ Lisowski J. // Journal of Shanghai Maritime University. - 2004. - No 104, Vol. 25. – P. 65 - 74.

68. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров для предупреждения столкновений судов при их внешнем управлении./ Бурмака И.А., Кулаков М.А., Пасечнюк С.С.// East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1.- С. 40-48.

69. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения/ Бурмака И.А., Калиниченко Г. Е., Кулаков М. А.// Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2016. – выпуск 3 (37). – С. 64 - 71.

70. Бурмака И.А. Управление группы судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2014. – выпуск 6 (28). – С. 9 - 13.

71. Бурмака И.А. Применение областей недопустимых значений параметров движения судов для безопасного расхождения/ Бурмака И.А., Пятаков Э. Н. // Austria - science, Issue: 11, 2018.- С. 34 - 39.

72. Hornauer S. Trajectory Planning with Negotiation for Maritime Collision Avoidance / Hornauer S., Hahn A., Blaich M., Reuter J. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 3, 2015, page 335-341.

73. Булгаков А.Ю. Использование опасной области курсов двух судов для выбора допустимого маневра расхождения/ Булгаков А.Ю.// Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 12 – 17.

74. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № 20. – С. 18 – 23.

75. Бурмака И.А. Определение области курсов двух судов, обеспечивающих безопасное расхождение/ И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков //Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск.– 2014. – выпуск 2 (7). – С. 17 - 20.

76. Булгаков А.Ю. Маневр расхождения трех судов с изменением их курсов / Булгаков А.Ю., Алексейчук Б.М.// Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. №1 . – С. 75 - 81.

77. Булгаков А.Ю. Маневр расхождения трех судов с изменением их курсов / Булгаков А.Ю., Алексейчук Б.М.// Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. №1 . – С. 75 - 81.

78. Булгаков А.Ю. Выбор маневра расхождения судов изменением курсов в системах управления движением судов/ Булгаков А.Ю., Пятаков Э.Н.// Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. №4 . – С 153 - 164.

79. Бурмака И.А. Выбор оптимального вектора управления судами изменением курсов для безопасного расхождения / Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – № 21. – С. 18 – 23.

80. Бурмака И.А. Выбор безопасного курса судна с учетом его инерционности при использовании областей опасных курсов/ Бурмака И.А.// Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22. – С. 17 – 21.

81. Кулаков М. А. Использование областей опасных скоростей для выбора маневра расхождения судов/ Кулаков М. А., Калиниченко Г.Е., Петриченко

Е. А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22. – С. 62 – 65.

82. Кулаков М. А. Процедура определения маневра расхождения изменением скоростей судов/ Кулаков М. А. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 - С.

83. Бурмака И.А. Условие существования множества маневров расхождения судов изменением скоростей/ Бурмака И.А. // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2017. - Вып. 27. – С. 32 – 37.

84. Бурмака И.А. Использование областей опасных курсов и опасных скоростей для выбора маневра расхождения/Бурмака И.А., Пасечнюк С. С., Кулаков М. А.// Эксплуатация, безопасность и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета им.адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск.– 2017. – выпуск 2 (83). –С. 76 - 80.

85. Бурмака И. А. Оптимальный маневр расхождения судов изменением их скоростей // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 24-27.

86. Кулаков М. А. Выбор оптимальных скоростей судов при внешнем управлении их процессом расхождения/ Кулаков М. А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2017. – № 23. – С. 51-57.

87. Пятаков Э.Н. Выбор стратегии расхождения при локально-независимом управлении судов в ситуации опасного сближения / Пятаков Э.Н., Пасечнюк С.С., Омельченко Т.Ю.// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 97 - 101.

88. Пятаков Э.Н. Отображение траектории расхождения судна уклонением вправо в множество относительных траекторий /Пятаков Э.Н., Омельченко Т.Ю. // East European Science Journal, , №11 (27), 2017, part 1.- С. 58-69.

89. Y. Kalinichenko. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning./ Y. Kalinichenko, I. Burmaka//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.-2016.-6/9 (84).- P. 20-31.

90. K. Benedict. Simulation Augmented Maneuvering Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf , S. Klaes// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 8, № 1, page 131-141, 2014.

91. Чапчай Е.П. Учет времени перекладки пера руля при повороте судна/ Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 110 – 113.

92. Стебновский О.В. Формирование переходной траектории поворота судна / Стебновский О.В.// Автоматизация судовых технических средств. – 2010. – № 16. – С.92-95.

93. Чапчай Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна / Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 139 – 142.

94. Вагущенко Л.Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности / Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И - Одесса: Феникс, 2005. - 274 с.

95. K. Benedict. Maneuvering Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Baldauf // TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 3, № 1, 2009, page 25-30.

96. Попов А. В. О повышении управляемости судна при ветре посредством ввода интеллектуальной составляющей в алгоритм авторулевого/ Попов А. В. // Вести. ВГАВТ. 2005, № 14, с. 27-35.

97. Юдин Ю.И. Маневренные характеристики судна как функции параметров его математической модели / Юдин Ю. И., Позняков С. И.// Вестн. МГТУ (Мурманск). 2006. 9, № 2, с. 234-240.

98. Artyszuk J.: Inherent Properties of Ship Maneuvering Linear Models in

View of the Full-mission Model Adjustment. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 4, 2016, pp. 595-604.

99. Шпекторов А.Г. Организация двухуровневой системы управления движением скоростного судна./ Шпекторов А.Г., Тхань ,Тунг Ле.: Навигация и управление движением: Материалы 8 Конференции молодых ученых: 1 этап, Санкт-Петербург, Ц-16 марта, 2006; 2 этап, Санкт-Петербург (в Интернете), 1 июня-31 окт., 2006; 3 этап, Санкт-Петербург, 25-29 сент., 2006 СПб: ЦНИИ "Электроприбор". 2007, с. 125-130.

100. Zhu M. Parameter Identification of Ship Maneuvering Models Using Recursive Least Square Method Based on Support Vector Machines/Zhu M., Hahn A., Wen Y.Q., Bolles A.// TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 1, 2017, page 23-29.

101. Gerigk M. An Integrated Model of Motion, Steering, Positioning and Stabilization of an Unmanned Autonomous Maritime Vehicle/ Gerigk M., Wójtowicz S.// TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 4, 2015, page 591-596.

102. Ahmed Y.A. Consistently Trained Artificial Neural Network for Automatic Ship Berthing Control/ Ahmed Y.A., Hasegawa K. // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 3, 2015, page 417-426.

103. M. Ljacki. Intelligent Prediction of Ship Maneuvering / M. Ljacki // TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 10, № 3, 2016, page 511-516.

104. Дмитриев С.П. Обоснование возможности использования линейно-квадратичного подхода при стабилизации судна на траекто-

рии/Дмитриев С.П., Пелевин А.Е. // Гироскопия и навигация. - 1997. - № 4. - С. 65-82.

105. C.J. Shi. Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters/ C.J. Shi, D. Zhao, J. Peng, C. Shen// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 3, № 1, 2009, page 105-110.

106. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы/ Вагущенко Л.Л. - Одесса: Феникс, 2004. - 302 с.

107. Lazarowska A. Multi-criteria ACO-based Algorithm for Ship's Trajectory Planning/ Lazarowska A.// TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 1, 2017, page. 31-36.

108. Глушков С.В. Использование нечеткой логики в системе автоматического управления курсом судна /Глушков С.В.// Приборы и системы: Упр., контроль, диагност. 2007, № 8, с. 28-32.

109. Богданов В. П. Синергетика и нейросетевые системы управления курсом судна / Богданов В. П., Виткалов Я. Л., Глушков С. В., Потапов А. С. и др. - Питер. - 2006, 205 с.

110. Оськин Д.А. Система управления морским судном с использованием нейросетевой идентификационной модели / Оськин Д.А. // Вестн. Мор. гос. ун-та. 2008, № 27, с. 3-12.

111. Бурмака И.А. Взаимодействие судов с компенсацией ситуационного возмущения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. - 2014. № 1 . – С 89 - 93.

112. Бурмака И.А. Учет динамики судна при плавании в стесненных водах/ Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Саков В.А.// Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. - 2014. № 4 . – С 48 - 54.

113. Бурмака И.А. Основные характеристики группы судов при внешнем управлении процессом судовождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е.,

Кулаков М.А.// Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 - С. 35-41.

114. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения/ Бурмака И.А., Калиниченко Г. Е., Кулаков М. А.// Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2016. – выпуск 3 (37). – С. 64 - 71.

115. Бурмака И.А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 56 - 60.

116. Калиниченко Г. Е. Учет динамических характеристик судов при формировании области их опасных курсов/ Калиниченко Г. Е. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 28-34.

117. Булгаков А.Ю. Использование опасной области курсов двух судов для выбора допустимого маневра расхождения/ Булгаков А.Ю.// Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 12 – 17.

118. Казак Ю.В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения /Казак Ю.В., Калиниченко Г. Е. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017 - С.

119. Калиниченко Г. Е. Учет навигационных опасностей при выборе маневра расхождения с помощью области опасных курсов / Калиниченко Г. Е. // XXX Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 декабря 2017г. – Харьков – С. 22 - 29.

120. Калиниченко Г. Е. Формирование области опасных курсов судов с учетом их динамических характеристик/ Калиниченко Г.Е., Пасечнюк С.С. // Автоматизация судовых технических средств. – 2017. – № 23. – С. 44-51.

121. Калиниченко Г.Е. Учет динамических характеристик судна при расчете момента времени его поворота на программный курс/ Калиниченко Г.Е. // Проблемы техники: Научно-производственный журнал. - 2014. № 1 . – С 118 - 122.

122. Калиниченко Г.Е. Учет инерционности судна при формировании области опасных курсов / Калиниченко Г.Е. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017.- С. 71 - 75.

123. Бурмака И.А. Методы внешнего управления судами в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е. // Херсон, 2017 / №2 (17) – С. 23 – 27.

124. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Сааков // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса : ОНМА, 2014. – С. 110-112.

125. Бурмака И.А. Учет инерционности судна и навигационных опасностей при расчете опасных областей курсов/ Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е.// Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса : ОНМА, 2015. – С. 114-115.

126. Калиниченко Е.В. Имитационное моделирование активного торможения судна с учетом течения/ Калиниченко Е.В., Калиниченко Г.Е. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 106-109.

127. Калиниченко Г. Е. Анализ условия сближения судов / Калиниченко Г. Е., Кулаков М.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 122–125.

128. Калиниченко Г. Е. Учет точечной навигационной опасности при использовании области недопустимых курсов судов / Калиниченко Г. Е. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 91–93.

129. Бурмака И. А. Определение допустимого множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И. А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 17-18 травня 2017 р. – Миколаїв : МУК, 2017. – С. 21–23.

130. Казак Ю.В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / Казак Ю.В., Калиниченко Г.Е. // Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – С.

131. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

132. Петросян Л.А. Дифференциальные игры преследования/ Петросян Л.А. - Л.: Изд. ЛГУ, 1977. - 222 с.

133. Петросян Л.А. Динамические игры и их приложения / Петросян Л.А., Томский Г.В. -Л.: Изд. ЛГУ, 1982. - 252 с.

134. Вагущенко, Л.Л. Судно как объект автоматического управления / Л.Л. Вагущенко – Одесса: ОГМА, 2000. – 140 с.

ДОДАТОК А

Лістинг програм для розрахунку меж області неприпустимих значень курсів суден з урахуванням їх інерційності повороту

```
unit Project_Un;  
interface  
uses  
    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,  
    ExtCtrls, StdCtrls;  
type  
    TForm1 = class(TForm)  
        Image1: TImage;  
        Timer1: TTimer;  
        Button2: TButton;  
        Button1: TButton;  
        ScrollBar1: TScrollBar;  
        Button3: TButton;  
        Button4: TButton;  
        Button5: TButton;  
        Button6: TButton;  
        Panel1: TPanel;  
        Panel2: TPanel;  
        Panel3: TPanel;  
        Panel4: TPanel;  
        Panel5: TPanel;  
        Panel6: TPanel;  
        Panel7: TPanel;
```

```
Panel8: TPanel;  
Panel9: TPanel;  
Panel10: TPanel;  
Panel11: TPanel;  
Panel12: TPanel;  
Panel13: TPanel;  
Panel14: TPanel;  
Panel15: TPanel;  
Panel16: TPanel;  
Panel17: TPanel;  
Panel18: TPanel;  
Panel19: TPanel;  
Panel20: TPanel;  
Panel21: TPanel;  
Panel22: TPanel;  
Panel23: TPanel;  
Button7: TButton;  
Button8: TButton;  
Button9: TButton;  
Button10: TButton;  
Button11: TButton;  
Button12: TButton;  
Button13: TButton;  
procedure FormCreate(Sender: TObject);  
procedure FormDestroy(Sender: TObject);  
procedure Image1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,  
    Y: Integer);  
procedure ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;  
    var ScrollPos: Integer);
```

```

procedure Image1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);
procedure Button8Click(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
procedure Button9Click(Sender: TObject);
procedure Button10Click(Sender: TObject);
procedure Panel20Click(Sender: TObject);
procedure Panel21Click(Sender: TObject);
procedure Panel22Click(Sender: TObject);
procedure Button7Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;
type
    Pt = array[0..360] of TPoint;
    Pt1 = array[1..720] of TPoint;
    PtC = array[0..120] of TPoint;
    APt = array[0..30] of TPoint;
var
    Form1: TForm1;
    ShowBmp,CargoBmp,CopyBmp,StartBmp : TBitmap;

```


Lh,Bh,Hh,Lp,Bp,Hp,B1,H1,B2,H2 : word;

 IndCrt,Nbt,Nbto,Nbto,OkBtn,Okbtn1,OkTimer,IndAutom,IndVrt,IndManl,
 IndWht,IndVol,IndVvod,OkOkVvod,IndX,IndY,IndZ,Indn : byte;
 {IndB,IndE,IndU,IndD : byte;}
 Nbrng,Nrngmax,Ay,s,NvrBtn,NbtVvod,OkOk,OkWht,OkVol,OkVvod,OkScroll :
 byte;
 IndK,IndV,IndA,IndD,IndDm : byte;
 Yc,Yc1 : word;
 CargoTyp,CargoCol : array[1..190] of byte;
 CargOk,HorizOk,AutomOk,Ok,StrsOk,CorrOk,ShowOk,RangOk,TwoBtOk,
 OkBttn1,OkBttn2 : byte;
 AutomChen,LimPl,LimW,LimV : Integer;
 OkLim,IndLim,NbtLim,PrLdLim,WhtLim,VolLim,Lim1,Lim2,Lim3 : byte;
 Begdop,Bd1,Bd2,Whtdop,Wd1,Wd2,Bdo1,Bdo2 : word;
 Enddop,Ed1,Ed2,Edo1,Edo2,Updop,Ud1,Ud2,Udo1,Udo2: word;
 ClassCargoTyp,ColTyp,TypCargo : byte;
 CargoName,CargoLab1,CargoLab2,CargoLab3 : string[20];
 CargoWight : LongInt;
 CargoSize1,CargoSize2,CargoSize3,Npr,V1,V2,V3,V4,V5,Nc,dN,Mnx,Mny
 : word;
 Xcn,Ycn,K1,K2,K21,K3,K4,K5,K1n,K2n,K3n,K4n,K5n,K1sc,K2sc,K3sc :
 Integer;
 Kot,Kot1,Kot2,Vot,Lm,alf,D,Dd,alf12,alf13,alf14,alf15,alf23,alf24,alf34 :
 real;
 alf25,alf35,alf45,Lm1,Lm2,Lm3,Lm4 : real;
 D12,D13,D14,D15,D23,D24,D34,D25,D35,D45 : real;
 Nves,IndOK,IndVes,IndScroll: byte;
 Re,ReV{,Coordt,CoordAt} : PtC;

```

Re1 : APt;
Bv,L1,L2,Lv,IndTimer,IndCol,Nb,IndS,IndAv,IndKm1,IndKm2,IndKm3    :
byte;
Xt,Yt,Xvs,Yvs, X1,Y1,X2,Y2,X3,Y3,X4,Y4,X5,Y5,Xn,Yn : Integer;
Dmin12,Dmin13,Dmin14,Dmin15,Dmin23,Dmin24,Dmin25,Dmin34,Dmin3
5,Dmin45:real;
DK1,DK2,DK3,DKm,K1m,K2m,K3m,DKs,K3l,DK1m,DK2m,DK3m,Mn1x,
Mn1y : word;
Msx,Msy,Ms1x,Ms1y,Xmd1,Ymd1 : word;
dt,dtk,dt2,dtk2,T1,T2,delK,delK2,aom,tf,ts,dtkp,IntS1,IntS2,IntC1,IntC2 :real;
tf11,tf12,tf21,tf22,L,G1,G2 : real;
Kf1,Kf2,Ko,tf1,tf2,Vo,Xm,Ym,Xn3,Yn3,Xsm,Ysm,Ky,MN,psi,DelDd,Koty
: real;
IndInersh,IndNav,IndCopy,IndB,IndC,IndStart: byte;
Xnv,Ynv,dRnv,alfnv,Xnv1,Ynv1,alfnv1,Xnv2,Ynv2,alfnv2 : word;
Dnv,Ddnv,Dnv1,Dnv2,DXnv,DYnv,DXt,DYt,Dtnv,alftnv,DXnv2,DYnv2,Dtn
v2,
alftnv2,Kvs,Kcs,aw1,aw2,Xvsr,Yvsr,Xtrl,Ytrl,Kt,Dvt,
Xvsw,Yvsw,Xtw,Ytw,DXvsr,DYvsr,DXtrl,DYtrl,alfvt,Kvsr,Ktr : real;
K1yn,K1yb,K2yn,K2yb,t,tn,tau1,tau2,K1y,K2y,tk,Xcr,Ycr : word;
DeltK1,DeltK2,cig1,cig2: Integer;
implementation
{$R *.DFM}
uses Unit_2D;
procedure MakeScale(Lh,Bh,Hh : word; var Lp,Bp,Hp : word; var Scale : re-
al);
begin
if Hh/Bh<0.4674 then
begin

```

```

    if Lh/Bh>1.2383 then
        Scale:=387{310}/Lh
    else
        Scale:=313{251}/Bh;
    end
else
    begin
        if Lh/Hh>2.5984 then
            Scale:=387{310}/Lh
        else
            Scale:=147{118}/Hh;
        end;
        Lp:=Round(Lh*Scale); Bp:=Round(Bh*Scale); Hp:=Round(Hh*Scale);
    end;
    procedure          Coord(Lp,Bp,Hp          :          word;          var
Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2 : word);
    begin
        Xn1:=202{162}-Round(Lp/2); Yn1:=162{130}-Round(Bp/2);
        Xk1:=202{162}+Round(Lp/2); Yk1:=162{130}+Round(Bp/2);
        Xn2:=565{452}-Round(Bp/2); Yn2:=400{320}-Round(Hp/2);
        Xk2:=565{452}+Round(Bp/2); Yk2:=400{320}+Round(Hp/2);
    end;
    procedure BLn(Bmp : TBitMap; Img : TImage;
        X,Y : Integer; BmpInd : byte);
    var
    i : byte;
    begin
        for i:=1 to 17 do
            begin

```

```

    ColorLine(Bmp,Img,X-18,Y-17+i,X+19,Y-
17+i,RGB(170+5*i,100+6*i,80+7*i),1,BmpInd);
    ColorLine(Bmp,Img,X-18,Y+17-i,X+19,Y+17-
i,RGB(170+5*i,100+6*i,80+7*i),1,BmpInd);
    end;
    end;
    procedure Pct1(Bmp : TBitMap; Img : TImage; BmpInd : byte);
    var
    i,j : byte;
    begin
    for i:=0 to 2 do
    begin
    ColorRect(Bmp,Img,727,9+48*i,787,53+48*i,RGB(70,80,110),BmpInd);
    for j:=1 to 13 do
    Col-
orLine(Bmp,Img,728,9+48*i+j,786,9+48*i+j,RGB(30+8*j,40+8*j,70+8*j),1,Bmp
Ind);
    Color-
Rect(Bmp,Img,729,29+48*i,785,49+48*i,RGB(200,220,240),BmpInd);
    end;
    ColorRect(Bmp,Img,665,6,725,151,RGB(120,130,160),BmpInd);
    for i:=0 to 2 do
    begin
    ColorRect(Bmp,Img,665,9+48*i,725,53+48*i,RGB(70,80,110),BmpInd);
    for j:=1 to 13 do
    Col-
orLine(Bmp,Img,666,9+48*i+j,724,9+48*i+j,RGB(30+8*j,40+8*j,70+8*j),1,Bmp
Ind);

```

Color-

```
Rect(Bmp,Img,667,29+48*i,723,49+48*i,RGB(200,220,240),BmpInd);
```

```
end;
```

```
end;
```

```
procedure Treug(Img : TImage; Ind,IndCol : byte);
```

```
var
```

```
CPnt : array[1..3] of TPoint;
```

```
begin
```

```
with Img.Canvas do
```

```
begin
```

```
if IndCol=0 then
```

```
begin
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(100,100,100));
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(170,170,170));
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(50,50,50));
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(100,100,100));
```

```
end;
```

```
if Ind=1 then
```

```
begin
```

```
CPnt[1].x:=769; CPnt[1].y:=502;
```

```
CPnt[2].x:=789; CPnt[2].y:=502;
```

```
CPnt[3].x:=779; CPnt[3].y:=487;
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```

    CPnt[1].x:=769; CPnt[1].y:=527;
    CPnt[2].x:=789; CPnt[2].y:=527;
    CPnt[3].x:=779; CPnt[3].y:=542;
    end;
    Polygon(CPnt);
    end;
end;

procedure DPaint(Bmp : TBitMap; Img : TImage);
var
    i : byte;
begin
    with Img.Canvas do
        begin
            Pen.Color:=TColor(RGB(220,200,180));
            ColorRect(Bmp,Img,423+64*3,273,469+64*3,288,RGB(220,200,180),0);
            ColorRect(Bmp,Img,423+64*4,273,469+64*4,288,RGB(220,200,180),0);
            ColorRect(Bmp,Img,725,7,789,198,RGB(70,60,75),0);
            for i:=1 to 94 do
                Col-
orLine(Bmp,Img,726,7+2*i,788,7+2*i,RGB(20+2*i,20+2*i,25+2*i),1,0);
                ColorRect(Bmp,Img,419,206,716,266,RGB(70,60,75),0);
                for i:=1 to 29 do
                    Col-
orLine(Bmp,Img,420,205+2*i,715,205+2*i,RGB(80+4*i,70+4*i,85+4*i),1,0);
                end;
            end;
        end;
    end;

procedure Buttn(Bmp : TBitMap; Image : TImage; X,Y,dX,dY : word;
    R,G,B : byte);
var

```

```

i,dRu,dGu,dBu,dRd,dGd,dBd : byte;
begin
  ColorRect(Bmp,Image,X-1,Y-1,X+dX+1,Y+dY+1,RGB(20,20,20),0);
  ColorRect(Bmp,Image,X,Y,X+dX,Y+dY,RGB(R,G,B),0);
  dRu:=Round((255-R)/4); dGu:=Round((255-G)/4); dBu:=Round((255-B)/4);
  dRd:=Round((R-60)/4); dGd:=Round((G-60)/4); dBd:=Round((B-60)/4);
  for i:=1 to 4 do
    begin
      ColorLine(Bmp,Image,X+i,Y+i,X+dX-i,Y+i,RGB(255-dRu*i,255-
dGu*i,255-dBu*i),1,0);
      ColorLine(Bmp,Image,X+i,Y+i,X+i,Y+dY-i,RGB(255-dRu*i,255-
dGu*i,255-dBu*i),1,0);
      ColorLine(Bmp,Image,X+i,Y+dY-1-i,X+dX-i,Y+dY-1-
i,RGB(60+dRd*i,60+dGd*i,60+dBd*i),1,0);
      ColorLine(Bmp,Image,X+dX-1-i,Y+i,X+dX-1-i,Y+dY-1-
i,RGB(60+dRd*i,60+dGd*i,60+dBd*i),1,0);
    end;
  end;
function ArcSin (x:real) :real;
  var
    Ast :real;
  begin
    if Abs(x)>=0.9999999 then
      begin
        if x>0 then Ast:=90
        else Ast :=-90;
      end
    else
      Ast :=ArcTan(x/(Sqrt(1-Sqr(x))))*57.3;
    end
  end

```

```

ArcSin :=Ast;
end;
function ArcCos(x:real) :real;
var
Ac :real;
begin
if x<>0 then
begin
Ac :=ArcTan((Sqrt(1-Sqr(x)))/x)*57.3;
if x>0 then ArcCos :=Ac
else ArcCos :=180-Ac;
end
else ArcCos:=90;
end;
function Pelg(x,y:real):real;
var C1,Aor,Aol:real;
begin
if y<>0 then C1 :=ArcTan(x/y)*57.3
else
begin
if x>0 then C1:=90
else C1:=270;
end;
if y>=0 then Aor :=360 + C1
else Aor :=180 + C1;
if Aor >=360 then Aol :=Aor - 360
else Aol :=Aor;
Pelg :=Aol;
end;

```



```

function Cour(x : Integer) : {real}Integer;
begin
  if x<0 then Cour:=360+x
  else
    begin
      if x>=360 then Cour:=x-360
      else Cour:=x;
    end;
  end;
function Distn(x,y:real):real;
  var Ds :real;
  begin
    Ds :=Sqrt(Sqr(x)+Sqr(y));
    Distn :=Ds;
  end;
procedure KotVot(Kv,Kb: Integer; Vv,Vb : real; var Kot,Vot : real);
  label 1;
  var
    dVx,dVy,psi : real;
  begin
    dVx:=Vv*sin(Kv/57.3)-Vb*sin(Kb/57.3);
    dVy:=Vv*cos(Kv/57.3)-Vb*cos(Kb/57.3);
    Vot:=Sqrt(Sqr(dVx)+Sqr(dVy));
    if Vot=0 then
      begin
        Kot:=0;
        goto 1;
      end;

```

```

psi:=ArcSin(dVx/Vot);
if dVy>0 then
  begin
    if dVx>0 then Kot:=psi
    else Kot:=360+psi;
  end
else
  begin
    Kot:=180-{}psi;
  end;
1 :end;

procedure ColorRectBor(Bmp : TBitMap; Img : TImage; Xn,Yn,Xk,Yk :
word;
                        Color,Color1 : LongInt; BmpInd : Byte);
{label 1,2;}
begin
  if BmpInd=1 then
    begin
      with Bmp.Canvas do
        begin
          Pen.Color:=TColor(Color1{5,5,5});
          Brush.Color:=TColor(Color);
          Rectangle(Xn,Yn,Xk,Yk);
        end;
      end
    else
      begin
        with Img.Canvas do
          begin

```

```

    Pen.Color:=TColor(Color1{5,5,5});
    Brush.Color:=TColor(Color);
    Rectangle(Xn,Yn,Xk,Yk);
    end;
    end;
    end;
procedure Region(Bmp : TBitMap; Image1 : TImage; V1,V2 : word;
    alf: real; Gr,Gr1 : Pt; Grs : Pt1);
label 1,2;
var Nb,Ne,Ncn,gam1,gam2,K2o,i,dN,K11o,K11,Ncno,No : word;
begin
    with Image1.Canvas do
        begin
            Font.Color:=TColor(RGB(20,30,80));
            Font.Size:=10;
            Font.Style:=[];
            Pen.Color:=TColor(RGB(255,155,155));
            Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,255));
            if V2>V1 then
                begin
                    Ncn:=0;
                    gam1:=Round(alf+Arcsin(Dd/D)); gam2:=Round(alf -Arcsin(Dd/D));
                    Nb:=Round(gam1+180-Arcsin(V1/V2));
                    Ne:=Round(gam1+Arcsin(V1/V2));
                    if Nb<Ne then dN:=Ne-Nb
                    else dN:=360-(Nb-Ne);
                    for i:=0 to dN do
                        begin
                            K2o:=Round(gam1+180-Arcsin(V1/V2))+i;

```

```

K2:=Cour(K2o);
if (K2-gam1>180+Arcsin(V1/V2)) and (K2-gam1<360-Arcsin(V1/V2))
then goto 1;
K11o:=Round(gam1+Arcsin((V2/V1)*sin((K2-gam1)/57.3)));
K11:=Cour(K11o);
KotVot(K11,K2,V1,V2,Kot1,Vot);
if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then
begin
Ncn:=Ncn+1;
Gr[i].x:=Round(237+K2o*0.65);
Gr[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
{Pen.Color:=TColor(RGB(55,155,55));
Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);}
Grs[Ncn].x:=Gr[i].x;
Grs[Ncn].y:=Gr[i].y;
end;
1: end;
for i:=Ncn to 360 do
begin
Gr[i].x:=Gr[Ncn].x;
Gr[i].y:=Gr[Ncn].y;
end;
Grs[Ncn+1]:=Grs[Ncn];
Nb:=Round(gam2+180-Arcsin(V1/V2));
Ne:=Round(gam2+Arcsin(V1/V2));
if Nb<Ne then dN:=Ne-Nb
else dN:=360-(Nb-Ne);

Ncno:=0;

```

```

for i:=0 to dN do
  begin
    K2o:=Round(gam2+180-Arcsin(V1/V2))+i;
    K2:=Cour(K2o);
    if (K2-gam2>180+Arcsin(V1/V2)) and (K2-gam2<360-Arcsin(V1/V2))
then goto 2;
    K11o:=Round(gam2+Arcsin((V2/V1)*sin((K2-gam2)/57.3)));
    K11:=Cour(K11o);
    KotVot(K11,K2,V1,V2,Kot1,Vot);
    if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then
      begin
        if i>0 then Ncno:=Ncno+1;
        Gr1[i].x:=Round(237+K2o*0.65);
        Gr1[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
        {Pen.Color:=TColor(RGB(255,55,55));}
        Ellipse(Gr1[i].x-1,Gr1[i].y-1,Gr1[i].x+1,Gr1[i].y+1);}
        Grs[2*Ncn{+1}-Ncno].x:=Gr1[i].x;
        Grs[2*Ncn{+1}-Ncno].y:=Gr1[i].y;
        No:=2*Ncn{+1}-Ncno;
      end;
2: end;

for i:=Ncn to 360 do Gr1[i]:=Gr1[Ncn];
for i:=2*Ncn+1 to 720 do Grs[i]:=Grs[2*Ncn];
Pen.Mode:=pmMask;
Brush.Color:=TColor(RGB(255,225,225));
Pen.Color:=TColor(RGB(255,195,195));
Polygon(Grs);
Pen.Mode:=pmCopy;

```

```

Pen.Color:=TColor(RGB(55,155,55));
for i:=1 to Ncn do
Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);
Pen.Color:=TColor(RGB(255,55,55));
for i:=1 to Ncno do
Ellipse(Gr1[i].x-1,Gr1[i].y-1,Gr1[i].x+1,Gr1[i].y+1);
end;
if V2<{=}V1 then
begin
Ncn:=0;
gam1:=Round(alf+Arcsin(Dd/D)); gam2:=Round(alf -Arcsin(Dd/D));
for i:=0 to 360 do
begin
K2o:=Round(gam1+i);
K2:=Cour(K2o);
K11o:=Round(gam1+Arcsin((V2/V1)*sin((K2-gam1)/57.3)));
K11:=Cour(K11o);
KotVot(K11,K2,V1,V2,Kot1,Vot);
if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then
begin
Ncn:=Ncn+1;
Gr[i].x:=Round(237+K2o*0.65);
Gr[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
Pen.Color:=TColor(RGB(55,155,55));
Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);
Grs[Ncn].x:=Gr[i].x;
Grs[Ncn].y:=Gr[i].y;
end;

```

```

end;
Grs[Ncn+1]:=Grs[Ncn];
Ncno:=0;
for i:=0 to 360 do
begin
K2o:=Round(gam2+i);
K2:=Cour(K2o);
K11o:=Round(gam2+Arcsin((V2/V1)*sin((K2-gam2)/57.3)));
K11:=Cour(K11o);
KotVot(K11,K2,V1,V2,Kot1,Vot);
if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then
begin
if i>0 then Ncno:=Ncno+1;
Gr1[i].x:=Round(237+K2o*0.65);
Gr1[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
Pen.Color:=TColor(RGB(255,55,55));
Ellipse(Gr1[i].x-1,Gr1[i].y-1,Gr1[i].x+1,Gr1[i].y+1);
Grs[2*Ncn+1-Ncno].x:=Gr1[i].x;
Grs[2*Ncn+1-Ncno].y:=Gr1[i].y;
No:=2*Ncn+1-Ncno;
end;
end;
for i:=2*Ncn+1 to 720 do Grs[i]:=Grs[2*Ncn+1];
Pen.Mode:=pmMask;
Brush.Color:=TColor(RGB(255,225,225));
Pen.Color:=TColor(RGB(255,195,195));
Polygon(Grs);

```

```

Pen.Mode:=pmCopy;
Pen.Color:=TColor(RGB(55,155,55));
for i:=1 to Ncn do
  Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);
  Pen.Color:=TColor(RGB(255,55,55));
  for i:=1 to Ncno do
    Ellipse(Gr1[i].x-1,Gr1[i].y-1,Gr1[i].x+1,Gr1[i].y+1);
    {Pen.Color:=TColor(RGB(155,195,155));
  Polyline(Gr);
  Polyline(Gr1);}
end;
if V2=V1 then
  begin
    Ncn:=0;
    gam1:=Round(alf+Arcsin(Dd/D)); gam2:=Round(alf -Arcsin(Dd/D));
    for i:=0 to 360 do
      begin
        K2o:=Round(gam1+i);
        K2:=Cour(K2o);
        K11o:=Round(180+2*gam1-K2o);
        K11:=Cour(K11o);
        KotVot(K11,K2,V1,V2,Kot1,Vot);
        if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then
          begin
            Ncn:=Ncn+1;
            Gr[i].x:=Round(237+K2o*0.65);
            Gr[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
            Pen.Color:=TColor(RGB(55,155,55));

```



```

    Ellipse(Gr[i].x-1,Gr[i].y-1,Gr[i].x+1,Gr[i].y+1);
    Grs[Ncn].x:=Gr[i].x;
    Grs[Ncn].y:=Gr[i].y;
    end;
end;
Ncno:=0;
for i:=0 to 360 do
    begin
        K2o:=Round(gam2+i);
        K2:=Cour(K2o);
        K11o:=Round(180+2*gam2-K2o);
        K11:=Cour(K11o);
        KotVot(K11,K2,V1,V2,Kot1,Vot);
        if cos((Kot1-alf)/57.3)>0 then
            begin
                if i>0 then Ncno:=Ncno+1;
                Gr1[i].x:=Round(237+K2o*0.65);
                Gr1[i].y:=Round(371-K11o*0.65);
                Pen.Color:=TColor(RGB(255,55,55));
                Ellipse(Gr1[i].x-1,Gr1[i].y-1,Gr1[i].x+1,Gr1[i].y+1);
                Grs[2*Ncn+1-Ncno].x:=Gr1[i].x;
                Grs[2*Ncn+1-Ncno].y:=Gr1[i].y;
                No:=2*Ncn+1-Ncno;
            end;
        end;
    for i:=2*Ncn+1 to 720 do Grs[i]:=Grs[2*Ncn];
    Pen.Mode:=pmMask;
    Brush.Color:=TColor(RGB(255,225,225));
    Pen.Color:=TColor(RGB(255,195,195));

```

```

    Polygon(Grs);
    Pen.Mode:=pmCopy;
    {Pen.Color:=TColor(RGB(155,195,155));
    Polyline(Gr);
    Polyline(Gr1);}
    end;
  end;
end;

procedure Vsl(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndV,IndCol,Lv,Bv,L1,L2 :
byte;
Xo,Yo,K : Integer; V : real; IndBmp : byte; var Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys: Integer);
var
  i,s,sv : byte;
  R,a : Integer;
  X,Y : real;
  L,Alf : array[0..120] of real;
begin
  Xn:=Xo; Yn:=Yo-Round((Lv-L1-L2)/2);
  Xk:=Xo; Yk:=Yo+Round((Lv-L1-L2)/2);
  a:=Round(Bv/2);
  for i:=0 to 30 do
    begin
      R:=a;
      Re1[i].x:=Round(Xk+R*cos((6*i)/57.3));
      Re1[i].y:=Round(Yk+R*sin((6*i)/57.3));
    end;
  for i:=0 to 2*a do
    begin
      X:=i-a;

```

```

Y:=(L1*Sqrt(Sqr(a)-Sqr(X)))/a;
Re[i].x:=Round(Xn+X);
Re[i].y:=Round(Yn-Y);
s:=i;
end;
for i:=0 to s do ReV[i]:=Re[i];
for i:=s+1 to s+31 do ReV[i]:=Re1[i-s-1];
for i:=s+32 to 120 do ReV[i]:=ReV[s+31];
sv:=s+31;
for i:=0 to sv do
begin
L[i]:=Distn(Xo-ReV[i].x,Yo-ReV[i].y);
Alf[i]:=Pelg(ReV[i].x-Xo,Yo-ReV[i].y);
end;
for i:=0 to sv do
begin
ReV[i].x:=Round(Xo+L[i]*sin((Alf[i]+K)/57.3));
ReV[i].y:=Round(Yo-L[i]*cos((Alf[i]+K)/57.3));
end;
for i:=sv+1 to 120 do ReV[i]:=ReV[sv];
L[1]:=Distn(Xo-Xn,Yo-Yn);
Alf[1]:=Pelg(Xn-Xo,Yo-Yn);
Xn:=Round(Xo+L[1]*sin((Alf[1]+K)/57.3));
Yn:=Round(Yo-L[1]*cos((Alf[1]+K)/57.3));
L[2]:=Distn(Xo-Xk,Yo-Yk);
Alf[2]:=Pelg(Xk-Xo,Yo-Yk);
Xk:=Round(Xo+L[2]*sin((Alf[2]+K)/57.3));
Yk:=Round(Yo-L[2]*cos((Alf[2]+K)/57.3));

```

```

Xs:=ReV[36].x; Ys:=ReV[36].y;
if IndBmp=0 then
  begin
    with Image.Canvas do
      begin
        if IndV=0 then
          begin
            if IndCol=0 then
              begin
                Pen.Color:=TColor(RGB(170,120,120));
                Brush.Color:=TColor(RGB(255,220,220));
              end
            else
              begin
                Pen.Color:=TColor(RGB(110,80,80));
                Brush.Color:=TColor(RGB(200,170,170));
              end;
            end
          else
            begin
              if IndCol=0 then
                begin
                  Pen.Color:=TColor(RGB(120,120,170));
                  Brush.Color:=TColor(RGB(200,220,230));
                end
              else
                begin
                  Pen.Color:=TColor(RGB(100,100,150));
                  Brush.Color:=TColor(RGB(170,190,200));
                end
              end
            end
          end
        end
      end
    end
  end
end

```

```

        end;
    end;
    Polygon(ReV);
    end;
end;
if IndBmp=1 then
begin
with Bmp.Canvas do
begin
if IndV=0 then
begin
if IndCol=0 then
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(170,120,120));
Brush.Color:=TColor(RGB(250,220,220));
end
else
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(150,100,100));
Brush.Color:=TColor(RGB(200,70,70));
end;
end
else
begin
if IndCol=0 then
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(120,120,170));
Brush.Color:=TColor(RGB(200,220,230));
end

```

```

    else
    begin
        Pen.Color:=TColor(RGB(100,100,150));
        Brush.Color:=TColor(RGB(70,90,200));
        end;
    end;
    Polygon(ReV);
    end;
end;

procedure ShipA(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndOk,IndLine,IndCol,Lv,Bv,L1,L2 : byte; Xv,Yv,K1,Xc,Yc,K2 : Integer; V1,V2 : real; IndBmp : byte);
var
    i,s,sv : byte;
    Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2,Xk,Yk,Kotr : Integer;
    X,Y : real;
    L,Alf : array[0..120] of real;
begin
    if IndBmp=1 then Bmp.Canvas.Pen.Mode:=pmMask;
    {if IndOK=2 then
    begin}
    with Image.Canvas do
    begin
        Vsl(Bmp,Image,1,IndCol{0},Lv,Bv,L1,L2,Xv,Yv,K1,V1,IndBmp,Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1);

```

```

Vsl(Bmp,Image,0,IndCol{0},Lv,Bv,L1,L2,Xc,Yc,K2,V2,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Y
k2,Xs2,Ys2);
    end;
    {end;}
    if IndBmp=1 then Bmp.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;
    Image.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;
    Image.Canvas.Pen.Width:=1;
    end;
    procedure DelKSig(Kn,Kk :real; var DK,sgn: Integer);
    var
    qvotn,qvotk : byte;
    Dlk : real;
    begin
    if sin(Kn/57.3)>0 then
    begin
    if cos(Kn/57.3)>0 then qvotn:=1
    else qvotn:=2;
    end
    else
    begin
    if cos(Kn/57.3)>0 then qvotn:=4
    else qvotn:=3;
    end;
    if sin(Kk/57.3)>0 then
    begin
    if cos(Kk/57.3)>0 then qvotk:=1
    else qvotk:=2;
    end

```

```

else
  begin
    if  $\cos(Kk/57.3)>0$  then qvotk:=4
    else qvotk:=3;
    end;
  case qvotn of
1:  begin
      case qvotk of
1:  begin
          Dlk:=Kk-Kn;
          DK:=Round(Abs(Dlk));
          if Dlk>0 then sgn:=1
          else sgn:=-1;
          end;
2:  begin
          Dlk:=Kk-Kn;
          DK:=Round(Abs(Dlk));
          sgn:=1;
          end;
3:  begin
          if  $Kk<Kn+180$  then
            begin
              Dlk:=Kk-Kn;
              DK:=Round(Abs(Dlk));
              sgn:=1;
            end
          else
            begin
              Dlk:=(360-Kk)+Kn;

```



```

    DK:=Round(Abs(Dlk));
    sgn:=-1;
    end;
end;
4: begin
    Dlk:=(360-Kk)+Kn;
    DK:=Round(Abs(Dlk));
    sgn:=-1;
    end;
    end;
end;
2: begin
    case qvotk of
1: begin
    Dlk:=Kn-Kk;
    DK:=Round(Abs(Dlk));
    sgn:=-1;
    end;
2: begin
    Dlk:=Kk-Kn;
    DK:=Round(Abs(Dlk));
    if Dlk>0 then sgn:=1
    else sgn:=-1;
    end;
3: begin
    Dlk:=Kk-Kn;
    DK:=Round(Abs(Dlk));
    sgn:=1;
    end;

```

```

4: begin
  if  $K_k < K_n + 180$  then
    begin
       $D_k := K_k - K_n$ ;
       $DK := \text{Round}(\text{Abs}(D_k))$ ;
       $\text{sgn} := 1$ ;
    end
  else
    begin
       $D_k := (360 - K_k) + K_n$ ;
       $DK := \text{Round}(\text{Abs}(D_k))$ ;
       $\text{sgn} := -1$ ;
    end;
  end;
end;

3: begin
  case qvotk of
    1: begin
      if  $K_k < K_n - 180$  then
        begin
           $D_k := (360 - K_n) + K_k$ ;
           $DK := \text{Round}(\text{Abs}(D_k))$ ;
           $\text{sgn} := 1$ ;
        end
      else
        begin
           $D_k := K_n - K_k$ ;
           $DK := \text{Round}(\text{Abs}(D_k))$ ;

```

```

    sgn:=-1;
    end;
end;
2: begin
    Dlk:=Kn-Kk;
    DK:=Round(Abs(Dlk));
    sgn:=-1;
    end;
3: begin
    Dlk:=Kk-Kn;
    DK:=Round(Abs(Dlk));
    if Dlk>0 then sgn:=1
    else sgn:=-1;
    end;
4: begin
    Dlk:=Kk-Kn;
    DK:=Round(Abs(Dlk));
    sgn:=1;
    end;
    end;
end;
4: begin
    case qvotk of
1: begin
    Dlk:=(360-Kn)+Kk;
    DK:=Round(Abs(Dlk));
    sgn:=1;
    end;
2: begin

```

```

if Kk<Kn-180 then
  begin
    Dlk:=(360-Kn)+Kk;
    DK:=Round(Abs(Dlk));
    sgn:=1;
  end
else
  begin
    Dlk:=Kn-Kk;
    DK:=Round(Abs(Dlk));
    sgn:=-1;
  end;
end;
3: begin
  Dlk:=Kn-Kk;
  DK:=Round(Abs(Dlk));
  sgn:=-1;
end;
4: begin
  Dlk:=Kk-Kn;
  DK:=Round(Abs(Dlk));
  if Dlk>0 then sgn:=1
  else sgn:=-1;
  end;
  end;
end;
end;
end;

```

```

procedure Inersh(alf,D,Dd,aom,Koty :real; K1n,K2n,K11,K2,K2o : Integer;
    IndVar,Ind3 : byte; V1,V2 : word; var K1do : Integer; K1d: word);
var
DelK,DelK2,sgn : Integer;
gam1,gam2,gam11 : word;
dtk,dtk2,Xm,Ym,MN,psi,DelDd : real;
begin
    DelKSig(K1n,K11,DelK,sgn);
    DelKSig(K2n,K2,DelK2,sgn);
    dtk:=DelK/aom;
    dtk2:=DelK2/aom;
    if (DelK<>0) and (DelK2=0) then
        begin
            Xm:=(((0.514*V1)/(aom*0.01745))*(cos(K1n/57.3)-cos(K11/57.3))-
                0.514*V2*dtk*sin(K2n/57.3);
            Ym:=(((0.514*V1)/(aom*0.01745))*(sin(K11/57.3)-sin(K1n/57.3))-
                0.514*V2*dtk*cos(K2n/57.3);
            end;
        if (DelK=0) and (DelK2<>0) then
            begin
                Xm:=(-(0.514*V2)/(aom*0.01745))*(cos(K2n/57.3)-cos(K2/57.3))+
                    0.514*V1*dtk2*sin(K1n/57.3);
                Ym:=(-(0.514*V2)/(aom*0.01745))*(sin(K2/57.3)-sin(K2n/57.3))+
                    0.514*V1*dtk2*cos(K1n/57.3);
                end;
        if (DelK<>0) and (DelK2<>0) then
            begin
                Xm:=(((0.514*V1)/(aom*0.01745))*(cos(K1n/57.3)-cos(K11/57.3))-

```

```

((0.514*V2)/(aom*0.01745))*(cos(K2n/57.3)-cos(K2/57.3));
Ym:=((0.514*V1)/(aom*0.01745))*(sin(K11/57.3)-sin(K1n/57.3))-
((0.514*V2)/(aom*0.01745))*(sin(K2/57.3)-sin(K2n/57.3));
end;
MN:=Sqrt(Sqr(Xm)+Sqr(Ym)); psi:=ArcTan(Xm/Ym)*57.3;
DelDd:=Abs(MN*sin((Koty-psi)/57.3))/1852;
if IndVar=1 then
gam11:=Round(alf+Arcsin((Dd+DelDd)/D))
else gam11:=Round(alf-Arcsin((Dd+DelDd)/D));
if Ind3=1 then
K1do:=Round(gam11+Arcsin((V2/V1)*sin((K2-gam11)/57.3)))
else K1do:=Round(Cour(180+2*gam11-K2o));
K1d:=Cour(K1do);
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
label 1,2,3;
var
Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,K11,K12,gam1,gam2,Nb,Ne: word;
Scale : real;
StC : string[3];
HoldTyp : byte;
i,j,k,Ncn,Ncno,No : word;
Xtr,Ytr,Ztr,Xs,Ys,Xcr,Ycr,K2o,K11o,K12o,K21o : Integer;
Gr,Gr1 : Pt;
Grs : Pt1;
n1,n2 : word;
begin
Nves:=2; IndOK:=0; IndVes:=1; IndK:=1; IndV:=1; IndA:=1; IndD:=1;
IndS:=1;

```

```

IndAv:=1; DKm:=360; IndDm:=1; IndKm1:=1; IndKm2:=1; IndKm3:=1;
IndInersh:=0;
IndNav:=1; IndCopy:=1; IndB:=1; IndC:=1; t:=0;
{Bv:=15; L1:=20; L2:=5; Lv:=60;}
alf:=90; V1:=15; V2:=20; D:=3; Dd:=1.0;
K1:=45; K2:=315;
K1n:=45; K2n:=315;
Bv:=10; L1:=12; L2:=4; Lv:=40;
Dnv:=2.3; alfnv:=50; Ddnv:=0.5;
Dnv1:=2.0; alfnv1:=30; Dnv2:=3.3; alfnv2:=60;
ColorRect(ShowBmp,Image1,0,0,670,512,RGB(219,217,209),0);
ColorRect(ShowBmp,Image1,0,0,560,512,RGB(250,255,255),0);
Xt:=280{335}+Round(45*D*sin(alf/57.3));
Yt:=255-Round(45*D*cos(alf/57.3));
Xvs:=280{335}-Round(45*D*sin(alf/57.3));
Yvs:=255+Round(45*D*cos(alf/57.3));
ShipA(ShowBmp,Image1,2,1,0,Lv,Bv,L1,L2,Xvs,Yvs,Round(K1),Xt,Yt,Roun
d(K2),V1,V2,0);
{delK:=90; aom:=2.7; T1:=10.23; Ko:=15; Vo:=20;}
delK:=54; aom:=0.5422; T1:=19.0; T2:=2.3; Ko:=45; Vo:=15; Ky:=99;
Alf:=100;
D:=3; Dd:=1; K2:=315; V2:=20; Koty:=120;
dtk:=delK/aom;
Xm:=((0.514*Vo)/(aom*0.01745))*(cos(Ko/57.3)-cos(Ky/57.3))-
0.514*V2*dtk*sin(K2/57.3);
Ym:=((0.514*Vo)/(aom*0.01745))*(sin(Ky/57.3)-sin(Ko/57.3))-
0.514*V2*dtk*cos(K2/57.3);
MN:=Sqrt(Sqr(Xm)+Sqr(Ym)); psi:=ArcTan(Xm/Ym)*57.3;
DelDd:=Abs(MN*sin((Koty-psi)/57.3))/1852;

```

```

repeat
dtkp:=dtk;
tf:=dtk/T1;
dt:=T1*ln(2-exp(-tf));
ts:=dt/T1;
dtk:=T1*(1-exp(-tf))+dt-T1*(2-exp(-tf))*(1-exp(-ts))+delK/aom;
until Abs(dtkp-dtk)<0.1;
n1:=Round(dtk); n2:=Round(dt);
IntS1:=0; IntC1:=0;
for i:=1 to n1 do
begin
tf1:=i-0.5;
Kf1:=Ko+aom*(tf1-T1*(1-exp(-tf1/T1)));
IntS1:=IntS1+sin(Kf1/57.3);
IntC1:=IntC1+cos(Kf1/57.3);
end;
Kf1:=Ko+aom*(n1-T1*(1-exp(-n1/T1)));
IntS2:=0; IntC2:=0;
for i:=1 to n2 do
begin
tf2:=i-0.5;
Kf2:=Kf1+aom*(T1*(2-exp(-n1/T1))*(1-exp(-tf2/T1))-tf2);
IntS2:=IntS2+sin(Kf2/57.3);
IntC2:=IntC2+cos(Kf2/57.3);
end;
Xm:=0.514*Vo*(IntS1+IntS2)-0.514*V2*(dtk+dt)*sin(K2/57.3);
Ym:=0.514*Vo*(IntC1+IntC2)-0.514*V2*(dtk+dt)*cos(K2/57.3);
MN:=Sqrt(Sqr(Xm)+Sqr(Ym)); psi:=ArcTan(Xm/Ym)*57.3;
DelDd:=Abs(MN*sin((Koty-psi)/57.3))/1852;

```



```

{dt,dtk,T1,delK,aom}
aom:=0.5422;
dtk:=delK/aom; dt:=0.1*dtk;
repeat
dtkp:=dtk;
tf11:=dtk/T1;
tf12:=dtk/T2;
tf21:=dt/T1;
tf22:=dt/T2;
L:=2-(T1*exp(-tf11)-T2*exp(-tf12))/(T1-T2);
dt:=-T1*ln((T1/T2)*exp(-tf22)+((T1-T2)/T1)/L);
G1:=2-(T1*exp(-tf11)-T2*exp(-tf12))/(T1-T2);
G2:=(Sqr(T1)*(1-exp(-tf21))-Sqr(T2)*(1-exp(-tf22)))/(T1-T2);
dtk:=dt+(Sqr(T1)*(1-exp(-tf11))-Sqr(T2)*(1-exp(-tf12)))/(T1-T2)-
G1*G2+delK/aom;
until Abs(dtkp-dtk)<0.1;
n1:=Round(dtk); n2:=Round(dt);
IntS1:=0; IntC1:=0;
for i:=1 to n1 do
begin
tf1:=i-0.5;
Kf1:=Ko+aom*(tf1-(Sqr(T1)*(1-exp(-tf1/T1))-Sqr(T2)*(1-exp(-
tf1/T2)))/(T1-T2));
IntS1:=IntS1+sin(Kf1/57.3);
IntC1:=IntC1+cos(Kf1/57.3);
end;
Kf1:=Ko+aom*(n1-(Sqr(T1)*(1-exp(-n1/T1))-Sqr(T2)*(1-exp(-n1/T2)))/(T1-
T2));
G1:=aom*(2-(T1*exp(-n1/T1)-T2*exp(-n1/T2))/(T1-T2));

```

```

IntS2:=0; IntC2:=0;
for i:=1 to n2 do
  begin
    tf2:=i-0.5;
    G2:=(Sqr(T1)*(1-exp(-tf2/T1))-Sqr(T2)*(1-exp(-tf2/T2)))/(T1-T2);
    Kf2:=Kf1-aom*tf2+G1*G2;
    IntS2:=IntS2+sin(Kf2/57.3);
    IntC2:=IntC2+cos(Kf2/57.3);
  end;
Xm:=0.514*Vo*(IntS1+IntS2)-0.514*V2*(dtk+dt)*sin(K2/57.3);
Ym:=0.514*Vo*(IntC1+IntC2)-0.514*V2*(dtk+dt)*cos(K2/57.3);
MN:=Sqrt(Sqr(Xm)+Sqr(Ym)); psi:=ArcTan(Xm/Ym)*57.3;
DelDd:=Abs(MN*sin((Koty-psi)/57.3))/1852;
KotVot(204,332,20,27,Kot,Vot);
end;
procedure TForm1.FormDestroy(Sender: TObject);
begin
  ShowBmp.Free;
  CargoBmp.Free;
  CopyBmp.Free;
end;
end.

```

ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача та відомості про апробацію
результатів дисертації

1. Бурмака И.А. Взаимодействие судов с компенсацией ситуационного возмущения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е. // Проблемы техники: Научно-производственный журнал. - 2014. № 1 . – С 89 - 93.
2. Бурмака И.А. Учет динамики судна при плавании в стесненных водах/ Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Саков В.А.// Проблемы техники: Научно-производственный журнал. - 2014. № 4 . – С 48 - 54.
3. Бурмака И.А. Основные характеристики группы судов при внешнем управлении процессом судовождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А.// Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 26. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015 - С. 35-41.
4. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения/ Бурмака И.А., Калиниченко Г. Е., Кулаков М. А.// Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2016. – выпуск 3 (37). – С. 64 - 71.
5. Кулаков М. А. Использование областей опасных скоростей для выбора маневра расхождения судов/ Кулаков М. А., Калиниченко Г.Е., Петриченко Е. А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22. – С. 62 – 65.
6. Бурмака И.А. Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 56 - 60.
7. Калиниченко Г. Е. Учет динамических характеристик судов при формировании области их опасных курсов/ Калиниченко Г. Е. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 28-34.

8. Калиниченко Г. Е. Учет навигационных опасностей при выборе маневра расхождения с помощью области опасных курсов / Калиниченко Г. Е. // XXX Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 декабря 2017г. – Харьков – С. 22 - 29.
9. Калиниченко Г. Е. Формирование области опасных курсов судов с учетом их динамических характеристик/ Калиниченко Г.Е., Пасечнюк С.С. // Автоматизация судовых технических средств. – 2017. – № 23. – С. 44-51.
10. Калиниченко Г.Е. Учет динамических характеристик судна при расчете момента времени его поворота на программный курс // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 1 . – С 118 - 122.
11. Калиниченко Г.Е. Учет инерционности судна при формировании области опасных курсов / Калиниченко Г.Е. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017.- С. 71 - 75.
12. Бурмака И.А. Методы внешнего управления судами в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.Е. // Херсон, 2017 / №2 (17) – С. 23 – 27.
13. Бурмака И.А. Маневр расхождения нескольких судов изменением курсов / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Сааков // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса : ОНМА, 2014. – С. 110-112.
14. Бурмака И.А. Учет инерционности судна и навигационных опасностей при расчете опасных областей курсов/ Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е.// Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2015 – Одеса : ОНМА, 2015. – С. 114-115.
15. Калиниченко Е.В. Имитационное моделирование активного торможения судна с учетом течения/ Калиниченко Е.В., Калиниченко Г.Е. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 106-109.

16. Калиниченко Г. Е. Анализ условия сближения судов / Калиниченко Г. Е., Кулаков М.А. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): Матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., 24-26 травня. 2016 – Херсон: ХДМА, 2016. – С. 122–125.
17. Калиниченко Г. Е. Учет точечной навигационной опасности при использовании области недопустимых курсов судов / Калиниченко Г. Е. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 91–93.
18. Бурмака И. А. Определение допустимого множества маневров расхождения судов изменением скоростей / Бурмака И. А., Кулаков М.А., Калиниченко Г.М. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 17-18 травня 2017 р. – Миколаїв : МУК, 2017. – С. 21–23.
19. Казак Ю.В. Учет динамических моделей вращательного движения судна при обеспечении безопасности судовождения / Казак Ю.В., Калиниченко Г.Е. // Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : НУ «ОМА», 2017.

АКТ УПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом підтверджується, що в приватному вищому навчальному закладі «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» одержали упровадження в навчальний процес спосіб формування області небезпечних курсів суден з урахуванням їх динаміки та метод вибору оптимального маневру розходження з урахуванням навігаційних перешкод, які розроблені в дисертаційній роботі Калініченко Григорія Євгеновича на тему „Вдосконалення методів розходження суден з урахуванням їх динаміки та навігаційних перешкод”.

Директор

Інституту післядипломної освіти

«Одеський морський тренажерний центр»,

к. т. н., професор

« 01 » 06 2018 р.



Пашченко Ю.В.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор НУ „ОМА”

професор Шемякін О.М.

06

2018 р.

А К Т

Про використання результатів дисертаційної роботи здобувача Калініченко Григорія Євгеновича на тему „Вдосконалення методів розходження суден з урахуванням їх динаміки та навігаційних перешкод” у навчальному процесі Національного університету “Одеської морської академії”.

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Пархоменко М.М., декан факультету Морських перевезень та технологій к. т. н., доцент Ворохобін І.І. і завідуючий кафедрою Управління судном к. т. н., доцент Бурмака І.О. склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача Калініченко Григорія Євгеновича на тему „Вдосконалення методів розходження суден з урахуванням їх динаміки та навігаційних перешкод” впроваджені у навчальний процес на кафедрі Управління судном за дисципліною “Маневрування та управління судном”.

Начальник навчального
відділу

Пархоменко М.М.

Декан факультету Морських перевезень та
технологій, к. т. н., доцент

Ворохобін І.І.

Завідуючий кафедрою Управління судном,
к. т. н., доцент

Бурмака І.О.

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор по науковій роботі Національного
університету «Одеська морська академія»
д.т.н., професор

В.А. Голіков

06 2018 р.

А К Т

про використанні результатів дисертаційної роботи Калініченко Г.Є. на тему
«Вдосконалення методів розходження суден з урахуванням їх динаміки та
навігаційних перешкод» в наукових дослідженнях, які виконуються в
Національному університеті «Одеська морська академія»

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини НУ
“ОМА” Савчук В.Д. і завідуючий кафедрою “Технічні засоби судноводіння”,
к.т.н., професор Чапчай П.О. склали цей акт у тому, що результати
дисертаційної роботи Калініченко Г.Є. ввійшли складовою частиною в звіт
по науково-дослідній роботі “Забезпечення безпеки судноводіння в стислих
районах плавання”, (№ ДР 0115U003580, 2015 — 2018 рр., п. 4.4, науковий
керівник — професор Чапчай П.О.).

Вдосконалено методи для безпечного розходження суден у стислих
районах плавання. Зазначені методи полягають у попередженні зіткнень
суден вибором оптимального маневру їх розходження зміною курсів за
допомогою області небезпечних значень курсів в залежності від динаміки
суден та при наявності навігаційних перешкод.

Начальник науково-дослідної
частини НУ «ОМА»,
к.т.н., с.н.с., професор

В.Д. Савчук

Завідуючий кафедрою Технічні засоби
судноводіння, к.т.н., професор

П.О. Чапчай

STATEMENT OF FACTS

This is to confirm that the company "MSC Shipmanagement Ltd, Cyprus" received the introduction of a method for choosing the optimal maneuver for collision avoidance by changing the courses of ships using the area of their dangerous courses, which is proposed in the dissertation project written by Mr. Grygorii Y. Kalinichenko on the theme "Improvement of methods of collision avoidance of vessels based on their dynamics and navigational obstacles".

The method is used upon training of officers of the navigational watch at subjects "Navigation in restricted waters" and "Bridge team management".

General Manager (Safety, Quality, Insurance, DPA),



Capt. S.K.Sinha

15.06.2018

Виклад обставин справи

Цим стверджуємо, що компанія «MSC Shipmanagement Ltd, Cyprus» отримала настанови з методики вибору оптимального маневрування для уникнення зіткнення шляхом зміни курсу суден в рамках площини здійснюваного ними небезпечного пересування, запропонованої в дисертаційному проекті п. Григорія Калініченко за темою «Вдосконалення методів розходження суден з урахуванням їх динаміки та навігаційних перешкод».

Методику використано при навчанні офіцерів навігаційної вахти за предметами «Навігація у обмеженому водному просторі» та «Менеджмент команди на містку»

Генеральний директор
(безпека, якість, страхування DPA)
15.06.2018

(підпис)

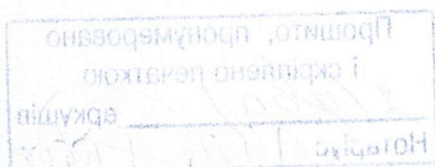
капітан С.К.Сінха

Цей переклад з англійської мови на українську мову зроблено мною, Брагарь Світланою Юріівною.

Підпис:

Брагарь С.Ю.

Місто Оде-



-са,

Україна дванадцятого листопада дві тисячі вісімнадцятого року.

Я, Поведьонкова І.І., приватний нотаріус Одеського міського нотаріального округу, засвідчую справжність підпису перекладача Брагарь Світлани Юріївни, який зроблено у моїй присутності.

Особу перекладача встановлено, кваліфікацію її перевірено.

Зареєстровано в реєстрі № 11495

Стягнуто плати згідно ст. 31 Закону України «Про нотаріат».

Приватний нотаріус



Прошито, пронумеровано і скріплено печаткою	
2/96а	аркушів
Нотаріус	