

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Петриченко Ольга Олександрівна

УДК 656.61.052

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

### **РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПЕРАТИВНОГО ВИБОРУ МАНЕВРУ РОЗ- ХОДЖЕННЯ СУДЕН ПРИ ПЛАВАННІ В СТИСЛИХ ВОДАХ**

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. Використані ідеї,  
результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Петриченко О.О.

Науковий керівник д. т. н., професор Цимбал М.М.

Одеса – 2021

## АНОТАЦІЯ

**Петриченко О.О.** Розробка методу оперативного вибору маневру розходження суден при плаванні в стислих водах. – 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, 2019.

Початковий аналіз літератури за проблемою забезпечення і підвищення безпеки судноводіння навів на думку, що головні напрямки вирішення цих проблем є підвищення точності визначення місця судна та оцінка безпеки судноводіння в стислих умовах плавання, а також застосування сучасних засобів безпечного судноводіння та інформаційно-управляючих технологій та розробка теоретичних методів та технічних заходів щодо попередження зіткнень суден у районах інтенсивного судноплавства.

За результатами виконаного аналізу було встановлено, що забезпеченню безаварійності судноводіння приділяється замало уваги, особливо в умовах стислих вод, а тому дисертаційне дослідження присвячене розробці способу оперативного розрахунку параметрів маневру розходження із використанням областей неприпустимих значень параметрів руху судна з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

У третьому розділі була побудована технологічна карта, де сформульовані мета та головна задача дисертаційного дослідження, яка складається з трьох незалежних складових задач. Також була сформульована гіпотеза дисертаційної роботи та показано, що результатом вирішення декількох незалежних складових задач є отримання наукових результатів дисертаційної роботи, які містять наукову новизну.

Реалізація практичних пропозицій щодо зниження аварійності судноводіння, які були одержані в дисертаційному дослідженні, визначає важливість і

підкреслює практичну цінність дисертаційного дослідження, а також сформульованого загального наукового положення дисертації.

В роботі також наведено методику вирішення головної задачі дослідження шляхом вирішення декількох невеликих поетапних складових задач. Для цього були використані сучасні методи аналітичного аналізу. Також для підтвердження коректності отриманих висновків та результатів дисертації було виконано імітаційне моделювання,

В основній частині дисертаційного дослідження приведені аналітичні вирази, що зв'язують параметри відносного і істинного руху пари суден. Показано, що значення істинного курсу базового судна, якщо заданий відносний курс і параметри руху цілі, які залежить ввідношення швидкості судна до швидкості цілі.

Враховуючи стратегію розходження судна під час ситуації небезпечного зближення судна, наведена оцінка рівня небезпека зближення судна за допомогою ситуативного збурення. Результати показують, що стратегія розходження судна залежить від значення ситуативного порушення та відносяться до стандартної стратегії і екстреного розходження. Стандартна стратегія розходження складається з двох етапів: ухилення праворуч і ухилення ліворуч. Структура стратегії екстреної розходження залежить від поведінки цілі під час процесу зближення, та складається з чотирьох етапів. В роботі було описано (у стратегічній частині) весь процес розходження починаючи з моменту ухилення з програмної траєкторії розходження до моменту повернення на неї після розходження з цілю.

Оскільки для розходження необхідно встановити наявність ситуативного збурення, а у разі потреби і вибрати курс ухилення, то розглянуто процедуру формування області неприпустимих значень параметрів руху судна за різних співвідношень швидкостей судна і цілі. Показано вибір оптимального значення курсу ухилення, за якого дистанція найкоротшого зближення судна з цілю рівна величині гранично - допустимої дистанції.

Приведений короткий опис шляху рішення головної задачі дисертаційного дослідження вибору безпечного маневру розходження за допомогою електронної карти шляхом відображення на ній планованих ділянок траєкторії розходження.

Також запропоновано аналітичні вирази і алгоритм для розробки процедур інформаційної системи, необхідних під час оцінки ситуації зближення і оптимізації маневру розходження.

Одержано комп'ютерні процедури формування області неприпустимих значень параметрів ухилення, за допомогою якої можна вибрати оптимальні значення часу і курсу ухилення судна за його небезпечного зближення з цілю.

В роботі також запропоновано і розглянуто комп'ютерні процедури формування області допустимих значень параметрів ухилення, які забезпечують безпечне розходження судна з цілю. Розглянуті процедури передбачають розрахунок меж областей для випадку переваги швидкості судна над швидкістю цілі, так і інакшому випадку.

Була розроблена комп'ютерна процедура, яка дозволяє визначити залежність моментів часу виходу щодо вибраного курсу з урахуванням сторони ухилення судна.

Також в роботі наведені результати імітаційного моделювання методу оперативного вибору маневру розходження суден, одержаного в результаті дисертаційного дослідження.

Приведено короткий опис програми імітаційного моделювання і показано, що вона складається з трьох модулів: вибору початкової ситуації небезпечного зближення і формування для неї області неприпустимих значень параметрів ухилення і області допустимих значень параметрів виходу; модуля визначення оптимальних параметрів розходження судна з відображенням на електронній карті істинної і відносної траєкторій розходження судна; а також модуля імітаційного моделювання процесу розходження судна.

Приведені результати імітаційного моделювання: вибір маневру розходження під час плавання судна у відкритому морі, а також показано, як врахо-

вуються навігаційні перешкоди під час вибору маневру розходження в стислих районах плавання.

Наукова новизна дослідження полягає в розробці нового методу визначення параметрів маневру розходження судна, що має комп'ютерну реалізацію і відрізняється застосуванням областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблено спосіб формування областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху;

- вперше запропоновано метод комп'ютерного відображення сформованих областей для вибору з їх допомогою безпечних маневрів розходження;

- вперше отримано процедуру вибору маневру розходження зміною курсу з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

Дисертаційному дослідженню властиве практичне значення, яке полягає у можливості упровадження його результатів на судна для попередження зіткнень, а також у використанні розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для розходження судна в ситуаціях небезпечного зближення.

Результати дисертаційного дослідження було впроваджені фактично компанією ДП «СМА ШИПС Україна» та компанією «UNITEAM MARINE» для перепідготовки судноводіїв компанії (акти впровадження від 10.02.2020 р. та 13.02.2020 відповідно). Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі на кафедрі «Судноводіння та електронних навігаційних систем» в розділах забезпечення безпеки маневрування судном Херерсонської державної морської академії (акт від 05.03.2020 р.).

**Ключові слова:** безпека судноводіння, попередження зіткнень суден, локально-незалежне управління, області неприпустимих параметрів ухилення та виходу.

Основні результати дисертаційного дослідження здобувача опубліковані в наступних наукових працях:

#### Основні наукові результати дисертації.

1. Петриченко О.А. Оперативный способ определения параметров маневра расхождения судна. / Петриченко О.А.// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018.- С. 68-71.
2. Пятаков Э.Н. Способ расхождения судна с двумя опасными целями последовательными уклонениями / Пятаков Э.Н., Пятаков В.Э., Петриченко О.А. // Austria - science, Issue: 16, 2018.- С. 44-49.
3. Пятаков В.Э. Способ последовательного расхождения судна с двумя опасными целями. / Пятаков В.Э., Петриченко О.А., Калюжный В.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2018. – № 24– С. 81-87.
4. Петриченко Е.А. Разработка судовой информационной системы предупреждения столкновений./ Петриченко Е.А., Петриченко О.А.// Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2018. - Вып. 28. – С. 120-130.
5. Петриченко О. А Использование областей недопустимых параметров расхождения для предотвращения столкновения судов. / Петриченко О. А.// Austria - science, Issue: 26, 2019.- С. 28-34.
6. Петриченко О.А. Способ оперативного определения параметров маневра расхождения судна. / Петриченко О. А., Цымбал Н.Н.// Austria - science, Issue: 23, 2019.- С. 48 – 53.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

7. Петриченко О.А. Предупреждения столкновений с помощью судовой информационной системы. /Петриченко О.А.// Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – С. 180 – 182.

8. Петриченко О.А. Способ выбора маневра расхождения с помощью электронной карты. / Петриченко О.А.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): Матеріали X Міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня. 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 128–130.

9. Петриченко О.А. Процедура оперативного выбора параметров маневра уклонения судна. /Петриченко О.А. // Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 15-16 листоп. 2018 – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 232 – 235.

## ANNOTATION

**Petrichenko O.A.** Development of method of operative choice of maneuver of divergence of ships at sailing in the compressed waters. 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, 2019.

How the previous analysis of literature on a problem showed providing and increases of safety of navigation, the increase of exactness of location ship and estimation of safety of navigation in the compressed terms are basic directions of decision of this problem, application of modern facilities of safe navigation and informatively-managing technologies and development of theoretical methods and technical measures on warning of collisions of ships in the districts of intensive navigation.

It was set as a result of analysis, that one of the most actual aspects of providing of accident-free of navigation is warning of collisions of ships at sailing in the compressed waters, therefore dissertation research is devoted to development of method of operative calculation of parameters of maneuver of divergence at his management with the use of regions of impermissible values of parameters of motion of ship taking into account the navigation obstacles and use of electronic charts.

The purpose of dissertation research and his main task which is represented by three independent component tasks is formulated in the developed technological card of research. Offered hypothesis of dissertation research and it is shown that as a result of decision of independent component tasks scientific dissertation job performances which contain a scientific novelty are got.



Possibility of introduction of the practical recommendations got in dissertation work, for the decline of accident rate of navigation, stipulates meaningfulness and practical value of dissertation research, and also the formulated scientific general of work.

In work the method of decision of main task of research is also considered by the decision of component tasks of dissertation work which shows stage-by-stage the decision of component tasks, for what the used modern methods of analytical analysis and the imitation design is conducted for confirmation of correctness of the got results of dissertation.

In basic part of dissertation research the resulted analytical expressions which link the parameters of relative and veritable motion of pair of ships. It is shown that the value of veritable course of base ship at the set relative course and parameters of motion of purpose depends on correlation of speeds of ship and target.

Strategies of divergence of ship and their description are considered in the situation of dangerous rapprochement with target. Resulted estimation of level of danger of rapprochement of ships by situation indignation. It is shown that strategies of divergence of ship depending on the value of situation indignation behave to standard strategies or strategies of urgent divergence. Standard strategies contain two parts and differentiate by deviation to the right and deviation to the left. The structure of strategies of urgent divergence depends on the conduct of target in the process of rapprochement and at the head resulted four types of strategies of urgent divergence. The strategies considered in a section describe all process of divergence from the moment of time of beginning of deviation from the programmatic trajectory of divergence to the moment of time of returning on her after divergence with target.

As for divergence it is necessary to set the presence of situation indignation and in the case of necessity choose the course of deviation, procedure of forming of region of impermissible values of parameters of motion of ship is considered at different correlations of speeds of ship and target. The choice of optimum value of

course of deviation is shown, at which distance of the shortest rapprochement of ship with target even to the size maximum - possible distance.

Resulted thumb-nail sketch of way of decision of main task of dissertation research of choice of safe maneuver of divergence by an electronic chart by the reflection on her of the planned parts of trajectory of divergence.

Analytical expressions and algorithm are also offered for development of procedures of the informative system, necessary at estimation of situation of rapprochement and optimization of maneuver of divergence.

Computer procedures of forming of region of impermissible values of parameters of deviation are got, by which it is possible to choose the optimum values of time and course of deviation of ship at his dangerous rapprochement with target.

In work it is also offered and considered computer procedures of forming of region of acceptability parameters of deviation, which provide safe divergence of ship with target. The considered procedures foresee the calculation of scopes of regions for the case of advantage of speed of ship above speed of target, so to other case.

Developed computer procedure which allows defining dependence of moments of time of output in relation to the chosen course taking into account the side of deviation of ship.

The results of imitation design of method of operative choice of maneuver of divergence of ships are represented in completion of work, got as a result of dissertation research.

The thumb-nail sketch of simulation routine is resulted and shown that she consists of three modules: choice of initial situation of dangerous rapprochement and forming for her of region of impermissible values of parameters of deviation and region of acceptability parameters of output; module of determination of optimum parameters of divergence of ship with the reflection on the electronic chart of veritable and relative trajectories of divergence of ship; and also module of imitation design of process of divergence of ship.

Resulted results of imitation design: choice of maneuver of divergence at sailing of ship at sea, and also the account of navigation obstacles is shown at the choice of maneuver of divergence in the compressed districts of sailing.

The scientific novelty of research consists in development of a new method of determination of parameters of maneuver of divergence of ship, that has computer realization and differs by application of regions of impermissible values of parameters of maneuvers of deviation and output of ship on the programmatic trajectory of motion taking into account the navigation obstacles and the use of electronic charts.

In dissertation work:

- the method of forming of regions of impermissible values of parameters of maneuvers of deviation and output of ship is first developed on the programmatic trajectory of motion;
- the method of computer reflection of the formed regions is first offered for the choice with their help of safe maneuvers of divergence;
- procedure of choice of maneuver of divergence by the change of course is first got taking into account the navigation obstacles and the use of electronic charts.

To the conducted dissertation research peculiar practical value which consists in possibility of introduction of his results on ships for warning of collisions, and also in used by the developers of the navigation informative systems intended for divergence of ship in the situations of dangerous rapprochement.

The practical results of thesis are inculcated by crew company DP «CMA Ships Ukraine» and «Uniteam Marine» (act of introduction from 10.02.2020 and act of introduction from 13.02.2020). Materials of thesis research are used in an educational process at teaching of discipline of «Navigation and electronic navigation systems» in The Kherson State Maritime Academy (act from 05.03.2020).

**Keywords:** safety of navigation, warning of collisions of ships, local management, region of impermissible parameters of deviation and output.

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

#### Basic scientific results of dissertation

1. Петриченко О.А. Оперативный способ определения параметров маневра расхождения судна. / Петриченко О.А.// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018.- С. 68-71.
2. Пятаков Э.Н. Способ расхождения судна с двумя опасными целями последовательными уклонениями / Пятаков Э.Н., Пятаков В.Э., Петриченко О.А. // Austria - science, Issue: 16, 2018.- С. 44-49.
3. Пятаков В.Э. Способ последовательного расхождения судна с двумя опасными целями. / Пятаков В.Э., Петриченко О.А., Калюжный В.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2018. – № 24. – С. 81-87.
4. Петриченко Е.А. Разработка судовой информационной системы предупреждения столкновений./ Петриченко Е.А., Петриченко О.А.// Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2018. - Вып. 28. – С. 120-130.
5. Петриченко О. А Использование областей недопустимых параметров расхождения для предотвращения столкновения судов. / Петриченко О. А.// Austria - science, Issue: 26, 2019.- С. 28-34.
6. Петриченко О.А. Способ оперативного определения параметров маневра расхождения судна. / Петриченко О. А., Цымбал Н.Н.// Austria - science, Issue: 23, 2019.- С. 48 – 53.

Publications which certify approbation of materials of dissertation

7. Петриченко О.А. Предупреждения столкновений с помощью судовой информационной системы. /Петриченко О.А.// Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – С. 180 – 182.

8. Петриченко О.А. Способ выбора маневра расхождения с помощью электронной карты. / Петриченко О.А.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): Матеріали X Міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня. 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 128–130.

9. Петриченко О.А. Процедура оперативного выбора параметров маневра уклонения судна. /Петриченко О.А. // Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, авторматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 15-16 листоп. 2018 – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 232 – 235.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВСТУП .....                                                                                                                   | 16  |
| РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗАВАРІЙНОСТІ СУДНОВОДІННЯ В СТИСЛИХ ВОДАХ.....                                      | 21  |
| 1.1 Аналіз літературних джерел за проблемою забезпечення безпечного плавання морських суден .....                             | 21  |
| 1.2 Вибір основного напрямку дисертаційного дослідження.....                                                                  | 37  |
| 1.3 Висновки за першим розділом.....                                                                                          | 38  |
| РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....                                                    | 40  |
| 2.1 Вибір тематики наукового дослідження .....                                                                                | 40  |
| 2.2 Методи дослідження, застосовані в дисертаційній роботі .....                                                              | 42  |
| 2.3 Стислий виклад методики проведення дисертаційного дослідження ...                                                         | 47  |
| 2.4 Висновки за другим розділом .....                                                                                         | 48  |
| РОЗДІЛ 3. АНАЛІТИЧНИЙ ОПИС ОПЕРАЦІЇ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН.....                                                         | 50  |
| 3.1 Основні аналітичні залежності між параметрами істинного і відносного руху пари суден .....                                | 50  |
| 3.2 Вибір маневру за стандартного і екстреного розходження суден в ситуації небезпечного зближення.....                       | 67  |
| 3.3 Вибір параметрів ухилення судна за допомогою області неприпустимих значень параметрів руху судна.....                     | 78  |
| 3.4 Спосіб вибору маневру розходження за допомогою електронної карти                                                          | 88  |
| 3.5 Висновки за третім розділом .....                                                                                         | 91  |
| РОЗДІЛ 4. МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ВИБОРУ МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН.....                                                            | 93  |
| 4.1 Аналітичні вирази для розрахунку параметрів маневру розходження..                                                         | 93  |
| 4.2 Розробка процедур інформаційної системи, необхідних для оцінки ситуації зближення і оптимізації маневру розходження ..... | 102 |
| 4.3 Висновки за четвертим розділом.....                                                                                       | 134 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДУ ОПЕРАТИВНОГО<br>ВИБОРУ МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН..... | 135 |
| 5.1 Короткий опис програми імітаційного моделювання .....                                     | 135 |
| 5.2 Вибір маневру розходження у відкритому морі.....                                          | 141 |
| 5.3 Урахування навігаційних перешкод під час вибору маневру<br>розходження.....               | 150 |
| 5.4 Висновки за п'ятим розділом .....                                                         | 171 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                 | 173 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                              | 175 |
| ДОДАТОК А. ....                                                                               | 190 |
| ДОДАТОК Б.....                                                                                | 192 |
| ДОДАТОК В.....                                                                                | 230 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Найважливішою проблемою для мореплавства є зменшення негативного впливу на людське життя, навколишнє середовище та майно. Цей вплив пов'язаний безпосередньо з підвищенням безаварійності судноводіння.

Інтенсивне судноплавство в умовах обмеженого простору ускладнюється, а навігаційні небезпеки створюють передумови виникнення різних надзвичайних ситуацій. Для стислих районів плавання характерною є швидкоплинна зміна навігаційної ситуації, контроль якої потребує розробки оперативних методів оцінки небезпеки зближення та вибір безпечного маневру розходження, який можливий лише з використанням комп'ютерної реалізації запропонованих методів запобігання зіткнення суден. Тому розробка способів управління суднами в ситуації небезпечного зближення в стислих водах, що є темою даної роботи, являється актуальним і перспективним науковим напрямом.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконання роботи проводилося згідно 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» (наказ 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, 2018 р.), в якій здобувачу належить окремий підрозділ.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження являється підвищення безпеки судноводіння шляхом вдосконалення методів локально-незалежного управління процесом розходження суден за рахунок розробки оперативного методу вибору маневру розходження з використанням



областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення судна та його виходу на програмну траєкторію руху. Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів і програми визначення параметрів маневру розходження суден з використанням областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію.

Наукова гіпотеза дисертаційного дослідження полягає у припущенні про можливість підвищення оперативності і коректності визначення параметрів оптимального маневру розходження суден за їх локально-незалежного управління шляхом використання областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію.

Для вирішення головної задачі дисертації методами теорії дослідження операцій було проведено її розділення на три незалежні складові задачі:

1. Формування областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху.
2. Процедура комп'ютерного відображення сформованих областей для вибору з їх допомогою безпечних маневрів розходження.
3. Розробка методу вибору маневру розходження зміною курсу з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

**Об'єктом дослідження** дисертації є попередження зіткнення суден.

**Предметом дослідження** є методи вибору оптимального маневру розходження за локально-незалежного управління процесом розходження суден.

**Методи дослідження.** Для вирішення зазначених раніше задач використовувалися методи:

- системного аналізу під час визначення теми дисертаційного дослідження та його методологічного забезпечення;
- дослідження операцій для декомпозиції головної задачі дисертації на декілька незалежних складових задач;
- теоретичної механіки для формалізації руху судна;
- математичного аналізу для розв'язання рівнянь руху судна в залежності від керуючих сигналів;

- аналітичної геометрії для формування меж області неприпустимих параметрів.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в розробці нового методу оперативного визначення параметрів маневру розходження судна, що має комп'ютерну реалізацію і відрізняється застосуванням областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблено спосіб формування областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху;
- вперше запропоновано метод комп'ютерного відображення сформованих областей неприпустимих значень параметрів руху для вибору з їх допомогою оптимальних маневрів розходження;
- отримала подальший розвиток процедура вибору маневру розходження зміною курсу з використанням електронних карт для урахування навігаційних перешкод.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у можливості упровадження результатів на судна для попередження зіткнень, а також у використанні розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для розходження судна в ситуаціях небезпечного зближення.

Практичні результати дисертаційного дослідження:

- 1) компанією ДП «СМА ШИПС Україна» для перепідготовки судноводіїв компанії (акти впровадження від 10.02.2020 р.)
- 2) компанією «UNITEAM MARINE» для перепідготовки судноводіїв компанії (акти впровадження від 13.02.2020 відповідно).
- 3) Матеріали дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі на кафедрі «Судноводіння та електронних навігаційних

систем» в розділах забезпечення безпеки маневрування судном Херсонської державної морської академії (акт від 05.03.2020 р.).

– **Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота виконана дисертантом самостійно: проведено аналіз основних напрямків проблеми забезпечення безпеки судноводіння, здійснено методологічне забезпечення дослідження по темі дисертаційної роботи, розроблено спосіб формування областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію, також розроблені алгоритми комп'ютерного відображення сформованих областей для вибору з їх допомогою безпечних маневрів розходження, здобувачем запропоновано метод вибору маневру розходження зміною курсу з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт та впроваджено результати роботи в виробничий процес. З наукових праць, опублікованих ним у співавторстві, в дисертаційній роботі використані лише ті положення, які належать автору особисто: формалізація процедури розходження з двома цілями послідовними ухиленнями [122], схема способу послідовного розходження з двома небезпечними цілями [123], розробка модуля розрахунку маневру розходження суднової інформаційної системи попередження зіткнень [124], аналітичний опис способу оперативного визначення параметрів маневру розходження [126].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати і положення роботи доповідалися і були схвалені на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях:

науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 16-17 листоп. 2017 р.), науково-технічна конференція « Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 15-16 листопаду 2018 р.), X Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018)» (Херсон, 29-31 травня 2018 р.).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень автором опубліковано 9 наукових праць (з них 5 одноосібно), в тому числі: в наукових профільних виданнях, що входять до переліку МОН України - 2 наукові статі [123, 124]; в зарубіжних наукових профільних виданнях - 4 наукові статті [121, 122, 125, 126]; в збірниках матеріалів наукових конференцій - 3 доповіді [127-129].

**Структура роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (132 найменування) і додатків. Загальний обсяг роботи становить 232 сторінки та містить 114 рисунків, зокрема: 173 сторінки основного тексту, 15 сторінок списку використаних джерел, 44 сторінки додатків.

## РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗАВАРІЙНОСТІ СУДНОВОДІННЯ В СТИСЛИХ ВОДАХ

### 1.1 Аналіз літературних джерел за проблемою забезпечення безпечного плавання морських суден

Вивчення проблеми забезпечення безпечного плавання суден потребувало проведення аналізу основних літературних джерел, завдяки якому було виявлено актуальні напрямки вирішення цієї проблеми:

1. Підвищення точності визначення місця судна і оцінка безпеки судноводіння в стислих умовах.
2. Застосування сучасних засобів безпечного судноводіння та інформаційно-управляючих технологій.
3. Розробка теоретичних методів та технічних заходів щодо попередження зіткнень суден у районах інтенсивного судноплавства.

Роботи відомих вчених [1-8] присвячені проблемі забезпечення безпеки судноводіння в цілому.

В роботі [1] освітлені основні проблеми та способи безпечного розходження суден, також зазначені шляхи основні вирішення, а в роботах [2,3] розглянуті питання розрахунку інерційних характеристик суден.

Застосування сучасних систем автоматичного управління рухом судна для забезпечення безпеки судноводіння розглянуто в роботі [4], а основні проблеми керованості і управління морських суден викладено в роботі [5]. Питання теорії і практики управління суден в різних ситуаціях і основні аспекти проблеми попередження зіткнення суден розглянуті у роботах [6,7]. Питання навігаційної безпеки судноводіння викладено в роботі [8].

В роботі [9] розглянуто усебічно аспекти вирішення проблеми попередження зіткнень суден. Було максимально точно проаналізовано концепції управління суднами в ситуації небезпечного зближення. Локально-незалежне управління процесом розходження є концепцією. Вона передбачає, що кожне

із суден в рамках вимог МППЗС-72 в частині маневрування суден приймає рішення про свій маневр розходження з урахуванням ситуації зближення з небезпечною ціллю. З іншого боку було розглянуто повне управління системою суден, що небезпечно зближаються, зовнішнім управлінцем, який враховує всі парні ситуацій зближення суден та синтезує загальну стратегію розходження, що складається із їх скоординованих маневрів. Для кожної із концепцій розходження в роботі [9] розроблено процедури вибору параметрів оптимальних стратегій розходження з урахуванням динаміки суден, що маневрують, та навігаційних перешкод.

Основним методом попередження зіткнення суден полягає у локально-незалежному управлінні процесу розходження, тому основні дослідження за проблематикою попередження зіткнення суден присвячені розвитку даної концепції.

Особливу актуальність проблема безпечного розходження суден прийняла у 70-ті роки ХХ ст. через інтенсивне упровадження обчислювальної техніки на морському флоті.

Одні з перших результатів дослідження щодо оптимізації процесу розходження суден були опубліковані в роботах [10-13]. Зазначимо, що початковий етап досліджень, викладений в роботі [10], характеризується формалізацією процесу розходження судна із  $n$ – цілями шляхом використання методів теорії оптимального управління.

В роботі рішення задачі розходження досягалося використанням дворівневої системи управління, яка прогнозує рух судна і небезпечних цілей при заданих збуреннях і завданих управляючих діях. За допомогою цієї системи управління за прийнятим критерієм оптимальності можливе визначення необхідних управляючих дій. Визначення алгоритму управління проводиться частиною системи, яка містить процедуру пошуку безпечного маневру, моделі управляючого судна та управляючих пристроїв, що працюють в прискореному масштабі часу з періодичним рішенням задачі. У роботі запропонована модель формалізації МППЗС, що на вході враховує взаємовідносне положен-

ня судна та цілі та їхні параметри руху, а як вихід містить логічні змінні, які дозволяють визначати можливість зміни курсу свого судна. Зазначимо, що параметри руху суде незмінні та гранично-допустимі дистанції зближення з суднами задані. Для моделі формалізації МППЗС-72 застосовується логічна функція п'яти змінних, які характеризують як відносне положення судна і цілі, так і параметри їх руху. Під час процесу розходження для кожного із суден-цілей приводиться характеристика небезпеки зближення, яка залежить від дистанції і часу найкоротшого зближення.

За допомогою розробленого алгоритму формується безпечна область курсів і швидкостей судна, яке вирішує задачу розходження, після чого слід вибрати оптимальний маневр розходження за критерієм оптимальності, яким являється проекція швидкості руху базового судна на напрям його програмного руху. Для пошуку рішення пропонується використання методу лінійного програмування. За допомогою моделі керованого руху судна, яка враховує динаміку базового судна, проводиться вибір оптимального безпечного маневру - швидкості і курсу та відповідних їм значень управляючих дій (кута кладки керма і обертів двигуна).

В роботах [11-13] знайшов своє віддзеркалення розвиток аналізованої моделі, які здійснюався у напрямі використання методів позиційних диференціально-різницевих ігор. Модернізація задачі полягає у наступному. За будь-якої позиції небезпечного зближення судну необхідно вибрати таку стратегію розходження, яка задовольняє умові переваги дистанції найкоротшого зближення над граничнодопустимою дистанцією та має враховувати обмеження навігаційних небезпек, які не суперечать вимогам МППЗС-72 і забезпечують мінімум відстані до порту призначення. При цьому допускається постійність стратегії і параметрів руху зустрічних суден.

Для рішення згаданої задачі пропонується наступний алгоритм. Залежно від початкової позиції динамічної системи слід визначити множину можливих стратегій відносно кожного із зустрічних суден. Потім визначаються можливі стратегії зустрічних суден, що максимально збільшують критерій

оптимальності базового судна (відстань до порту призначення), для яких необхідно визначити область допустимих безпечних маневрів розходження базового судна та вибрати з них конкретну стратегію з мінімальним критерієм оптимальності.

Задача пошуку оптимальних значень стратегії, як і в роботі [10], приводиться до задачі лінійного програмування, з цією метою лінеаризації піддаються нелінійні обмеження безпеки розходження і урахуванню навігаційних перешкод. Пошук управляючих дій пропонується проводити за допомогою моделі керованого судна за алгоритмом, аналогічному в роботі [10].

Наукове обґрунтування МППЗС алгеброю логіки описується в роботі [14]. В цій роботі розглядаються три області, які в системі координат з осями часу і дистанції найкоротшого зближення. Якщо судно за будь-яких причин попадає до однієї з областей, тоді визначається імовірна поведінка обох суден відповідно вимогам МППЗС. Також в роботі [15] детально описане застосування диференціальних ігор щодо формалізації процесу розходження.

В роботах [16-18] розглядається розходження судна з поодинокі ціллю в разі відсутності навігаційних перешкод. Зважаючи на те, що в них одержано аналітичні вирази, які характеризують області безпечних курсів і швидкостей зустрічних суден, та залежності між істинними і відносними параметрами руху. Рішення задачі досягнуто за допомогою методів оптимального управління.

Ряд робіт співробітників інституту Кібернетики присвячено застосуванню методу нелінійної інтегральної інваріантності, викладеному в монографіях [19,20], для опису процесу розходження суден і створенню системи попередження їх зіткнень.

Аналітичний опис процесу судноводіння в якості зовнішнього збурення розглядає  $2n$ -мірний вектор параметрів  $n$  зустрічних суден, які ускладнюють рух базового судна, а в якості інваріантних координат вибрані відстані від базового судна до зустрічних суден. За думкою автора згаданим методом для найбільш небезпечних значень  $V$  і  $K$  кожного із зустрічних суден можливо



знайти допустиму область стратегій базового судна, які забезпечують безаварійне розходження зі всіма суднами, хоча таке твердження автора не завжди є коректним.

В роботах [21-25] викладено питання формування допустимих областей маневру судна методом нелінійної інтегральної інваріантності, для яких розходження судна із  $n$  цілями є безпечним. Ієрархію цілей ергатичної системи управління судном, що організована на базі методу нелінійної інтегральної інваріантності, розглянуто у роботі [26], а в роботі [27] запропоновано варіант можливої формалізації МППЗС-72.

Питання використання маневрів розходження, що складаються із двох елементів, тобто одночасної зміни курсу і швидкості або послідовною двократною зміною курсу базового судна через деякий інтервал часу, обговорюється у роботах [28,31]. Слід додати, що метод нелінійної інтегральної інваріантності для одноелементних маневрів не прийнятний для формування області допустимих двоелементних маневрів. Ще одним недоліком розглянутого методу є відсутність врахування часу в явному вигляді.

В роботі [29] описується винахід системи попередження зіткнень суден "Антикон", яке отримало авторське свідоцтво. а в роботі [30] приведено результати математичного моделювання функціонування ергатичної системи попередження зіткнень суден.

В такій постановці задачі синтезу системи попередження зіткнень суден особливістю є її властивість ергатичності [32], тобто ЕОМ формує область безпечних маневрів в один крок, а судноводій із області вибирає один в залежності від свого критерію оптимальності.

Методи теорії оптимальних дискретних процесів запропоновано в роботах [33,34] для рішення задачі синтезу оптимального управління судна під час розходження. В задачі прийнято допущення про незмінність швидкостей і курсів зустрічних суден і відсутність зовнішніх збурень.

Формалізація задачі проведена наступним чином. В районі плавання знаходиться  $n$  суден і задані їх швидкості  $V_j$ .

Розходження базового судна з рештою суден вважається безпечним в інтервалі часу  $[0-T]$ , якщо дистанції найкоротших зближень зі всіма  $n$  зустрічними суднами більші гранично допустимої дистанції  $d_0$ .

У задачі розглянуто три критерії оптимальності: критерій мінімального відхилення судна від заданого курсу (МВК), критерій мінімального відхилення судна від заданої траєкторії (МВТ) і критерій мінімуму перекладань керма (МПК).

На величину кутової швидкості судна, його поточні значення курсу і координат накладаються обмеження. Зміна кутової швидкості завжди тягне за собою управління судном здійснюється зміною його кутової швидкості за незмінного модулю швидкості судна. Значення кутової швидкості, які задовольняють приведеним обмеженням, формують область допустимих управлінь.

Через аналітичний вид критерію оптимальності і обмежень рішення задачі в явному вигляді неможливе, тому приводиться алгоритм її чисельного рішення, який використовує апарат теорії оптимальних дискретних процесів. Згідно алгоритму пошук оптимального управління по кожному із критеріїв (МПК, МВТ, МВК) ідентичний і базується на методі можливих напрямів, який реалізовано на ЕОМ. Спочатку знаходиться хоча б одне допустиме управління, щодо якого методом ітерацій здійснюється пошук оптимального управління без порушення прийнятих обмежень. В разі оновлення інформації задача розв'язується повторно.

Питання оцінки ситуації розходження суден розглянуто в роботах [35,36]. В роботі [35] запропоновано процедуру формалізації контролю поточної ситуації і прийняття рішень по її управлінню, а різні аспекти відображення ситуації розходження суден обговорюються в роботі [36].

Дослідження ситуації небезпечного зближення судна з ціллю представлені в роботах [37-39], в яких визначені умови існування не пустої множини

маневрів розходження та розглянуто спосіб визначення параметрів оптимального маневру по критерію затрат ходового часу, який слід мінімізувати. Приведена залежність типу стратегії розходження від області взаємних обов'язків суден, яка визначається вимогами МППЗС-72. В роботах показано, що стратегія розходження має ділянку ухилення з програмної траєкторії руху та ділянку повернення на неї. В залежності від типу взаємодії суден, що виникла під час зближення, оптимізація маневру розходження проводиться по різним критеріям оптимальності.

Результати аналізу імітаційного моделювання процесів розходження суден і виявлених недоліків системи бінарної координації взаємодії суден, яку реалізовано в МППЗС-72 в частині маневрування суден під час небезпечного зближення, наведено в роботі [40].

Роботи [41-43] присвячені урахуванню навігаційних перешкод під час розходження судна із ціллю. В роботі [41] запропоновано аналітичний опис навігаційних перешкод для їх урахування під час визначення параметрів маневру розходження в задачі попередження зіткнення суден, а в роботі [42] приведено рішення задачі урахування лінійної навігаційної перешкоди під час вибору стратегії розходження суден. В роботі [43] викладено умову існування множини допустимих маневрів розходження з урахуванням навігаційних перешкод в районі плавання суден, що зближуються.

В роботах [44-50] розглянуто урахування динаміки суден під час виконання повороту під час визначення параметрів маневру безпечного розходження з використанням різних моделей обертального руху судна, найбільш проста з яких є кінематична модель повороту судна з постійною кутовою швидкістю, що ускладнюється під час формування більш адекватних реальному процесу повороту судна моделей шляхом використання диференціальних рівнянь другого та третього порядків відносно змінної курсу судна. В роботі [49] приведені характеристики поворотності судна по матеріалам натурального експерименту, а результати імітаційного моделювання процесу розходження суден, в якому ураховується їх динаміка, представлені в роботі [50].

В публікації [51] розглянуто питання вибору оптимального курсу для розходження суден за криволінійного руху

В роботі [52] приведені докладні дослідження ситуації небезпечного зближення пари суден і визначені умови існування множини маневрів розходження, а також розглянуто процедуру визначення оптимального маневру по критерію втрат ходового часу, який слід мінімізувати.

Робота [53] присвячена оціночній системі дій для ухилення від зіткнення з поодиноким судном. В роботі описується моделююча схема трьох рівнів, що базується на технології синтезу. Принцип функціонування модулів, які описують траєкторію руху судна і його параметри руху, використовує перетворення координат в геометричній моделі, в результаті чого визначаються оцінка ризику зіткнення, параметри маневру, і дії щодо ухилення від зіткнення.

В роботі [54] наведений метод neural fuzzy system оцінки ризику зіткнення суден. Він одержаний за результатами останніх досліджень проблем безпеки морського судноплавства, запропоновано в роботі [54]. Ураховуючи переваги штучної нейронної мережі в системі fuzzy, може бути створений новий тип системи neural network system. Приведені в роботі результати підтвердили переваги нового методу в порівнянні з традиційними методами.

У статті [55] контроль і управління рухом судна розглядається, як багаторівнева система, яка керує судновими системами під час переходу між портами. В ній існує відповідність між функціональними шарами контролю і судновими підсистемами.

Так як процес управління рухом судна являється багатовимірним, а його характеристики є нелінійними і нестационарними, зважаючи на те, що задача вибору оптимального маневру розходження носить ігровий характер, то, як зазначається в роботах [56-58], аналітичний опис і вирішення цієї задачі є дуже складним завданням, рішення якого показано в означених роботах.

В роботі [59] розглянуто складні ситуації в стислих районах плавання в силу обмеженої пропускну здатності сприйняття інформації судноводій не

може провести переробку її необхідного обсягу, що ускладнює прийняття коректних рішень, особливо в ситуаціях небезпечного зближення, а перспективи використання сучасних технічних засобів для управління суднами в умовах обмеженого простору плавання з метою попередження зіткнень суден розглянуті в роботі [60].

Реалізація пропонованих теоретичних концепцій створення систем формування безпечного маневру, як зазначається в роботах [61,62], зустрічає значні труднощі під час визначення множини безпечних маневрів розходження з урахуванням обмежень по безпечному розходженню з цілями, врахуванню навігаційних перешкод, а також не суперечать МППЗС-72. В згаданих роботах запропоновано способи індивідуального врахування кожного з перелічених обмежень, після чого проведена розробка методу їх спільного врахування.

З метою підвищення безпеки та ефективності управління суднами в роботі [63] розроблена система ATSM (Autonomous Traffic Management System), в якій використовується інформація з АІС, що знаходиться на судні- тренажері Shioji Maru, а також дані радіолокаційного спостереження про переміщення суден в Токійській затоці, необхідні для оцінки умов судноплавства. Подальша робота системи ATSM полягає у визначенні оптимальних траєкторій переміщення всіх суден в районі, для чого використовуються програми Forward Dynamics Programming. Оптимальний шлях, який розрахований системою ATSM, по часу проходження скорочується до 4%.

В роботі [64] запропоновано новий фузі-метод, як додаток до засобів можливості ухилення від зіткнення системи СУРС/АІС, згідно з яким данні СУРС та данні АІС вводяться в Морську географічну інформаційну систему MGIS для визначення даних про область знаходження базового судна та інерційних сил, що діють на нього, при цьому знаходиться захисне коло і розраховується небезпечний індекс. Прогнозування часу і позиції зіткнення може бути отримано за допомогою аналітичної моделі морської системи GIS, зва-

жаючи на те, що оператор системи управління рухом судна може прийняти дії щодо попередження зіткнення суден.

В роботі [65] викладається теоретичне обґрунтування автономної судової системи попередження зіткнення СА (Collision avoidance), яка містить алгоритм розходження суден та розглядаються вимоги до автономної навігації з урахуванням найбільш суттєвих чинників. Використання штучного інтелекту, методами якого є еволюційні алгоритми, логіка фуззі, нейромережа та комбінація цих методів, положено в основу системи СА, що запропонована в роботі.

Розходження суден екстремим маневром в ситуації надмірного зближення розглянуто у роботах [66-68]. Робота [66] присвячена визначенню параметрів динамічної моделі обертального руху судна по експериментальним даним, одержаних за натурними спостереженнями, а в публікації [67] викладено спосіб формування стратегії розходження суден в ситуації надмірного зближення. Питанням урахування кутової швидкості судна в разі вибору маневру розходження в ситуації надмірного зближення присвячена робота [68].

В роботі [69] розглянуто проблему безпечного розходження суден в залежності від особливостей їх взаємодії, що зумовлюється небезпечним зближенням суден та визначає їх взаємні обов'язки в процесі розходження.

Взаємодія суден регламентується згідно з МППЗС-72 та проведена формалізація її бінарної координації. При надмірному зближенні суден виникає ситуація невизначеності їх подальшої поведінки та відсутності координації, для компенсації якої запропоновано стратегію екстреного розходження.

У монографії [70] розглянуто особливості задачі розходження суден в морі шляхом зміщення на паралельну лінію шляху та показано, що підвищення ефективності запобігання зіткнень може бути досягнуто створенням нових алгоритмів та інтелектуальних систем. В роботі для розходження використовується один маневр - зміщення на паралельну лінію шляху під відповідним кутом до лінії вихідного курсу. Оптимальний маневр розходження вибирається з множини можливих варіантів по комплексному критерію, що

враховує вимоги до завчасності, безпеки, економічності та помітності маневру.

Застосування віртуальних областей для забезпечення плавання в стислих водах показано у роботах [71,72], в яких показана основна перевага віртуальної області, що являється відображенням суднової безпечної зони із простору відносного руху в простір істинного руху та забезпечує можливість її застосування для безпечного розходження суден за наявності навігаційних перешкод в разі застосування графічного зображення ситуації зближення на електронній карті, зважаючи на те, що в роботі [72] приведено процедуру відображення віртуальної безпечної області судна на електронній карті.

Для забезпечення розходження суден в разі небезпечного зближення та виникненні загрози зіткнення в роботах [73,74] розглянуто спосіб формування суднової безпечної зони, в якому використано математичні моделі, що містять системне урахування істотних факторів, впливаючих на розміри безпечної зони, яка призначена для практичного використання в процесі плавання судна в різних умовах.

Для вибору безпечного маневру розходження в роботах [75-77] розглянуто спосіб формування області неприпустимих значень курсів двох суден, а в роботах [78-80] приведено процедуру вибору маневру розходження трьох суден зміною курсів за їх зовнішнього управління.

В роботі [81] розглянуто визначення маневру розходження зміною курсів або швидкостей пари суден, використовуючи метод їх зовнішнього управління, для чого запропоновано області неприпустимих значень параметрів руху суден, що зближуються.

В роботі [82] викладено бінарні взаємодії суден, що виникають за їх небезпечного зближення, та розглянуто їх координованість і ефективність, для чисельної оцінки яких запропоновано процедуру та отримано необхідні аналітичні вирази. Показано, що МППЗС-72 являється бінарним координатором взаємодії пари суден за їх небезпечного зближення та розглянута формалізація МППЗС-72. Приведено математичну модель взаємодії групи суден, що



небезпечно зближуються, визначено їх стратегію розходження в разі зовнішнього управління їх процесом розходження за допомогою зміни курсів.

Робота [83] присвячена вдосконаленню зовнішнього управління рухом суден в районах контролю СУРС, в якій засновані підходи формування безпечних траєкторій руху суден за допомогою системи експертних знань на принципах повного зовнішнього управління процесом розходження суден, що постачаються судноводіям та службам руху суден. Процедура планування траєкторій руху суден запропоновано також в статті, зважаючи на те, що запропоновано використання спеціалізованих алгоритмів узгодження за допомогою попередніх домовленостей по досягненню рішення, яке має відповідати вимогам правил запобігання зіткнень та бути прийнятним для всіх суден, а також враховувати динаміку суден. Всі складові, потрібні для вирішення проблеми попередження зіткнення з декількома суднами, об'єднані в спільній процедурі, що тестується в даний час у моделюванні на декількох випробувальних стендах.

В роботі [84] розглянуто різні способи попередження зіткнень суден, такі як УКХ - радіо, радіолокаційні та оглядові, а також приведені більш просунуті способи: застосування генетичного алгоритму, та теорії нечітких множин, які можуть бути застосовані в ситуаціях бінарних взаємодій, але в ситуаціях небезпечного зближення групи суден їх використання утруднене. В зв'язку з цим в роботі для попередження зіткнень суден запропоновано розподілений локальний Алгоритм пошуку (DLSA), що передбачає спілкування кількох суден один з одним в межах певної області на УКХ-радіо зв'язку. Алгоритм DLSA обчислює ризик зіткнення, базуючись на інформації, отриманої від сусідніх суден.

У статті [85] представлена базова модель процесу розходження суден у ситуації загрози зіткнення із використанням моделі гри  $J$  об'єктів, яка включає в себе якість індексу управління грою у формах гри інтегральної оплати та остаточного платежу. Як модель управління процесом розходження в першому наближенні прийнята модель багатокрокової матричної гри у вигляді



двоїстої задачі лінійного програмування. У програмному забезпеченні Matlab / Simulink була розроблена комп'ютерна програма ігрового управління GSC з ціллю визначення безпечної траєкторії власного судна. Одержані результати були перевірені прикладами комп'ютерного моделювання із використанням програми GSC.

В статті [86] описано штучну нейронну мережу синтезу безаварійного управління в ситуаціях небезпечного зближення суден та шість методів оптимальної теорії ігор. В статті показано, що для умов гарної та обмеженої видимості визначення безпечного маневру власного судна під час розходження з іншими суднами можливе застосуванням оптимальних алгоритмів керування методами теорії ігор. В роботі порівняно безпечне управління судном у ситуації небезпечного зближення за допомогою методів кооперативної та антагоністичної ігор, також були розглянуті багатокрокові позиційні некооперативні та кооперативні ігри. Прикладами комп'ютерного моделювання були проілюстровані одержані теоретичні результати для ситуації зближення судна із вісьмома зустрічними цілями з метою визначення безпечного маневру розходження.

Спосіб вибору маневру розходження зміною курсів або швидкостей суден методами їх зовнішнього управління розглянуто в роботах [87,108], в яких запропоновано області неприпустимих значень параметрів руху суден в ситуації небезпечного зближення.

Опису чинників, які слід враховувати під час визначення безпечної швидкості судна, присвячена стаття [88], в якій також визначено оптимальну швидкість для морських плавучих об'єктів, з урахуванням вказівок, що стосуються швидкості судна, згідно з МППЗС-72, і рейсових чартерів. В статті запропоновано визначення наступних понять: судноплавство, маневрування суден і безпечна швидкість для об'єктів морського плавання.

Вивченню надійності інформації про дистанцію і час найкоротшого зближення, одержаних за допомогою АІС судна присвячена стаття [89]. Коли є дані цілей від АІС і радіолокаційного стеження, то згідно з рекомендацією

ІМО вимагається виконання критеріїв відповідності. У статті також представлені дослідження, які проведені в реальних умовах з достовірною інформацією, що представлена АІС судна, про дистанцію і час найкоротшого зближення з іншим судном, оснащеним АІС, шляхом порівняння даних з АІС та представленими САРП.

В роботі [90] стверджується, що індекс ризику зіткнення суден є основним показником можливості зіткнень суден, зважаючи на те, що в ній проведено аналіз і приведені переваги та недоліки різних методів розрахунку індексу ризику зіткнення суден. Недоліки моделі оцінки, яка запропонована Kearon J, компенсує модель оцінки ризику зіткнення суден на основі комплексної площини, зважаючи на те, що індекс ризику зіткнення будується у вигляді тривимірного зображення просторової кривої індексу ризику. Для реалізації запропонованої моделі необхідно одиночного мікрокомп'ютерного чіпу в системи прийняття рішень по забезпеченню безпечного судноводіння.

В роботах [91,93,109,110,112,113] розглянуто попередження зіткнень суден методами зовнішнього управління процесом розходження з використанням області небезпечних значень швидкостей суден.

Спосіб вибору безпечних курсів ухилення суден під час зовнішнього управління їх процесом розходження за допомогою областей небезпечних курсів запропоновано в роботі [92], в якій показано, що через інерційність судна під час повороту знижується дистанція найкоротшого зближення до величини меншої граничнодопустимої відстані. Приведено обґрунтування залежності для розрахунку уточненого значення граничнодопустимої відстані з урахуванням інерційності судна та здійснено опис процедури вибору маневру зміни курсу одного з суден за незмінних параметрів руху іншого судна.

В роботах [94,95,97] розглянуто питання координації взаємодії двох та трьох суден в ситуації небезпечного зближення. Графічний спосіб оцінки значення ситуаційного збурення запропоновано в роботах [96,98].

Роботи [99-102] присвячені методу локально-незалежного управління процесом розходження суден з використанням областей неприпустимих значень параметрів руху судна, що маневрує.

Модель доменів суден для попередження їх зіткнення з ухваленням рішень за допомогою COLREG на основі поля штучного потенціалу представлено в публікації [103]. Розглянуто способи ухвалення рішень по запобіганню зіткненням з декількома суднами і складання плану попереднього маршруту, зважаючи на те, що запропоновано повний набір рішень для запобігання зіткненню між декількома суднами методами інтелектуальної навігації з використанням організації зверху «вниз» для структуризації системи. Система має два рівня: перший - ухвалення рішень про запобігання зіткненням і другий - планування маршруту. Згідно із загальних вимог COLREG, аналіз ухвалення рішень про розподіл розподілених маршрутів для попередження зіткнень аналізується для ситуацій, пов'язаних з рухомими суднами, а також для суден, що стоять. Для планування шляху в деталях використовується метод штучного потенційного поля (АПФ), який разом з моделлю суднової області, що враховують параметри руху цільових суден, може більш точно визначати рухомі характеристики перешкод. В результаті проведеного моделювання виявилось, що пропонується система може працювати ефективно.

В роботі [104] запропоновано метод оцінки ризику зіткнення з використанням режиму істинного руху з використанням даних АІС для забезпечення безаварійності і ефективності роботи судна. Однією з причин можливого зіткнення суден є метод оцінки ризику зіткнень, який звичайно оцінюється по значенню параметрів точки найкоротшого зближення (СРА), яка пов'язана з відносним рухом. У статті для оцінки ризику зіткнення пропонуються лінія прогнозованого зіткнення (LOPC) і зона перешкод по цілі (OZT), значення яких пов'язані з істинним рухом, і це дає можливість виявити ситуації небезпечного зближення і забезпечити безаварійне плавання в стислих водах.

В даний час судноплавний домен є важливим критерієм оцінки безпеки судноплавства, про що наголошується в роботі [105], форма і розмір якого за-

лежать від багатьох чинників. Одним із найважливіших з них є доступна область маневрування, вплив якої на форму і розмір суднових доменів у відкритому морі і обмежених водах розглядається у цій статті. Для дослідження було використано метод моделювання. В симуляціях з використанням системи ECDIS брали участь експертні навігатори. Проведено порівняння областей суднових проходів у відкритому морі і забороненій зоні.

Об'єктом розгляду роботи [106] є домен судна як критерій безпеки в зоні обережності схеми розділення руху. Це особливо важливо в стислих водах з інтенсивним рухом, де критерії дистанція найкоротшого зближення (CPA) і час найкоротшого зближення важко застосовувати. В даному дослідженні продовжено вивчення суднових доменів в схемах розділення руху. Також визначені суднові домени у області обережності і вироблено порівняння їх з доменами суден, що йдуть смугами руху.

Результати розробки аналітичного методу пошуку областей ризику з високим рівнем небезпеки приведені у статті [107], в якій було проаналізовано стан руху суден моделями, які засновані на моделі газу і зоні перешкод по Цельту (OZT). Використовуючи цей метод, можливо проаналізувати площу з погляду відносного кута, розміру, швидкості і щільності суден. Метод OZT був розроблений для того, щоб показати зону зіткнення з позиції базового судна. Використовуючи цей метод для аналізу морського руху суден, оцінюється вірогідність зіткнення.

Методу локально-незалежного управління процесом розходження суден з урахуванням форми відносної траєкторії розходження присвячені роботи [111,114]. Питанням вдосконалення технології зовнішнього управління рухом суден в районах контролю СУРС присвячені роботи [115,116].

В роботах [117-120] розглянуті питання вибору маневру розходження декількох суден зміною курсів або швидкостей.

Роботи [121-129], у виконанні яких приймав участь автор одноосібно або в співавторстві, досліджують питання локально-незалежного управління процесом розходження суден з використанням областей неприпустимих зна-

чень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху.

## 1.2 Вибір основного напрямку дисертаційного дослідження

Аналіз літературних джерел з питань вирішення проблеми забезпечення безаварійного судноводіння, проведений в попередньому підрозділі, показав, що домінуючим аспектом вирішення проблеми зниження аварійності суден є попередження їх зіткнень розробкою нових методів вибору оптимальної стратегії розходження з урахуванням можливостей сучасних комп'ютерних інформаційно-управляючих технологій. Вказана проблема особливо актуальна для суден, що знаходяться в стислих водах, коли для розходження потрібно урахування як навігаційних перешкод, так і навколишніх суден.

Локально-незалежному управлінню процесом розходження суден присвячено безліч розробок, бо в стислих районіх плавання навігаційна ситуація змінюється постійно та миттєво, тому потрібно розробити прості, але водночас оперативні методи вибору безпечного маневру розходження. Таке вирішення проблеми дає тільки використання комп'ютерів та комп'ютерних технологій, що дозволяють змодельовати ситуацію та передвчислити рух системи суден взагалі.

Ефективним засобом оцінки небезпеки зближення та вибору оптимального маневру розходження являються області неприпустимих параметрів руху суден, що зближаються. Локально-незалежне управління процесом розходження суден являється основним і на сьогодні, то для розробки методів оперативного прийняття рішень в ситуаціях виникнення загрози можливого зіткнення доцільно використати принцип формування областей неприпустимих значень параметрів руху судна для визначення параметрів маневру розходження зміною курсу судна.

Отже, задача розробки способів вибору маневрів розходження зміною курсу судна за допомогою відповідних областей неприпустимих значень па-

раметрів руху судна за локально-незалежного управління процесом розходження суден з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт, реалізованого комп'ютерним інформаційним забезпеченням, що підвищує оперативність, простоту і надійність способу, є перспективною і актуальною тематикою. Цим і обумовлюється вибір напряму досліджень даної дисертаційної роботи.

### 1.3 Висновки за першим розділом

Після вивчення профільної літератури у першому розділі були проаналізовані основні напрямки та методи вирішення проблеми зниження аварійності суден щодо забезпечення безаварійного судноводіння.

Розробка методів, що дозволяють змодельовати рух судна та його кооперацію з іншими суднами в стислих водах дає змогу оцінити ризики та вирішення проблеми забезпечення безпеки судноводіння.

Розробка методів моделювання руху судна за плавання в стислих районах сприяє вирішенню проблеми забезпечення безпеки судноводіння. Попереднє моделювання руху в стислих районах плавання дозволяє оцінити безпеку судноводіння в стислих умовах.

За результатами проведененого аналізу літературних джерел та можливих методів і способів вирішення проблеми, головним напрямом вирішення зазначеної проблеми стало вдосконалення методів попередження зіткнень суден в ситуаціях їх небезпечних зближень.

В розділі обґрунтований основний напрям дисертаційного дослідження, яке присвячене розробці способу вибору безпечного маневру розходження зміною курсу за локально-незалежного управління процесом розходження суден за допомогою відповідних областей неприпустимих значень параметрів руху судна з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

Об'єктом дослідження є попередження зіткнення суден, а предметом дослідження є методи вибору оптимального маневру розходження за локально-незалежного управління процесом розходження суден.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 2.1 Вибір тематики наукового дослідження

В попередньому розділі було встановлено, що однією із найбільш важливих проблем забезпечення безпеки судноводіння при плаванні в стислих водах являється попередження зіткнень суден, тому дисертаційне дослідження присвячено розробці способу оперативного розрахунку параметрів маневру розходження за його локально-незалежного управління із використанням областей неприпустимих значень параметрів руху судна з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

Для вирішення вказаної задачі необхідно, по-перше, провести розробку процедури формування області неприпустимих значень параметрів курсу і часу початку ухилення судна та області неприпустимих значень курсу і часу початку виходу на програмну траєкторію, що потребує пошуку аналітичних виразів межі цих областей. По-друге, використовуючи одержану процедуру, слід з допомогою комп'ютерної графіки розробити процедуру відображення згаданих областей і спосіб визначення рівня небезпеки ситуації зближення судна з ціллю. Під час виникнення загрози зіткнення слід забезпечити розрахунок параметрів маневру безпечного розходження судна зміною курсу. Розроблені процедури необхідно реалізувати у комп'ютерній програмі для забезпечення простоти та оперативності одержаного в роботі способу.

Тому проблема попередження зіткнень суден шляхом розробки сучасних способів вдосконалення процесу розходження з урахуванням навігаційних перешкод, реалізованих в комп'ютерній програмі, є перспективною і актуальною, чим і обумовлюється вибір теми дисертації в наступній редакції: «Розробка методу оперативного вибору маневру розходження суден при плаванні в стислих водах».



Для вирішення задачі по даній проблемі слід розглянути наступні питання:

- провести розділення головної задачі дисертаційного дослідження на складові задачі, використовуючи методи системного підходу;

- розробити спосіб формування області неприпустимих значень параметрів курсу і часу початку ухилення судна та області неприпустимих значень курсу і часу початку виходу на програмну траєкторію і комп'ютерну процедуру їх графічного відображення;

- сформувати метод комп'ютерного визначення рівня небезпеки ситуації зближення судна і цілі та вибору маневру розходження з урахуванням навігаційних перешкод шляхом застосування областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення судна та його виходу на програмну траєкторію руху;

- для перевірки коректності методу розходження суден, який запропоновано в дисертації, розробити комп'ютерну програму імітаційного моделювання вибраного маневру.

Актуальність тематики дисертаційної роботи визначається не тільки необхідністю підвищення рівня безпеки судноводіння, але й необхідністю вдосконалення методів розходження суден в стислих водах.

Наукову новизну дисертаційного дослідження можуть скласти розробка методу формування областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення судна та його виходу на програмну траєкторію руху та процедури визначення рівня небезпеки ситуації зближення судна і цілі та вибору маневру розходження з урахуванням навігаційних перешкод з використанням електронної карти.

Економічна ефективність дисертаційного дослідження полягає в можливому скороченні збитків пов'язаних із зниженням рівня аварійності внаслідок запобігання зіткненням суден.

Можливість реалізації пропонованого наукового дослідження забезпечуються розробкою теоретичної частини роботи і її перевірка за допомогою імітаційного моделювання.

Об'єктом дослідження дисертації є попередження зіткнень суден.

Предметом дослідження є методи вибору оптимального маневру розходження за локально-незалежного управління суднами в ситуації небезпечного зближення.

## 2.2 Методи дослідження, застосовані в дисертаційній роботі

Технологічна карта методологічного забезпечення дисертаційного дослідження, як рішення головної задачі дисертаційної роботи методами системного підходу приведена на рисунку 2.1.

Необхідність підвищення рівня безпеки судноводіння і розробки сучасних оперативних методів визначення оптимального процесу розходження суден є сучасними запитами практики.

Метою дисертаційного дослідження являється підвищення безпеки судноводіння шляхом вдосконалення методів локально-незалежного управління процесом розходження суден за рахунок розробки оперативного методу вибору маневру розходження з використанням областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення судна та його виходу на програмну траєкторію руху.

Наукова гіпотеза дисертаційного дослідження полягає у допущенні про можливість підвищення оперативності і коректності визначення параметрів оптимального маневру розходження суден за їх локально-незалежного управління шляхом використання областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію.

Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів і програми визначення параметрів маневру розходження суден з використанням областей

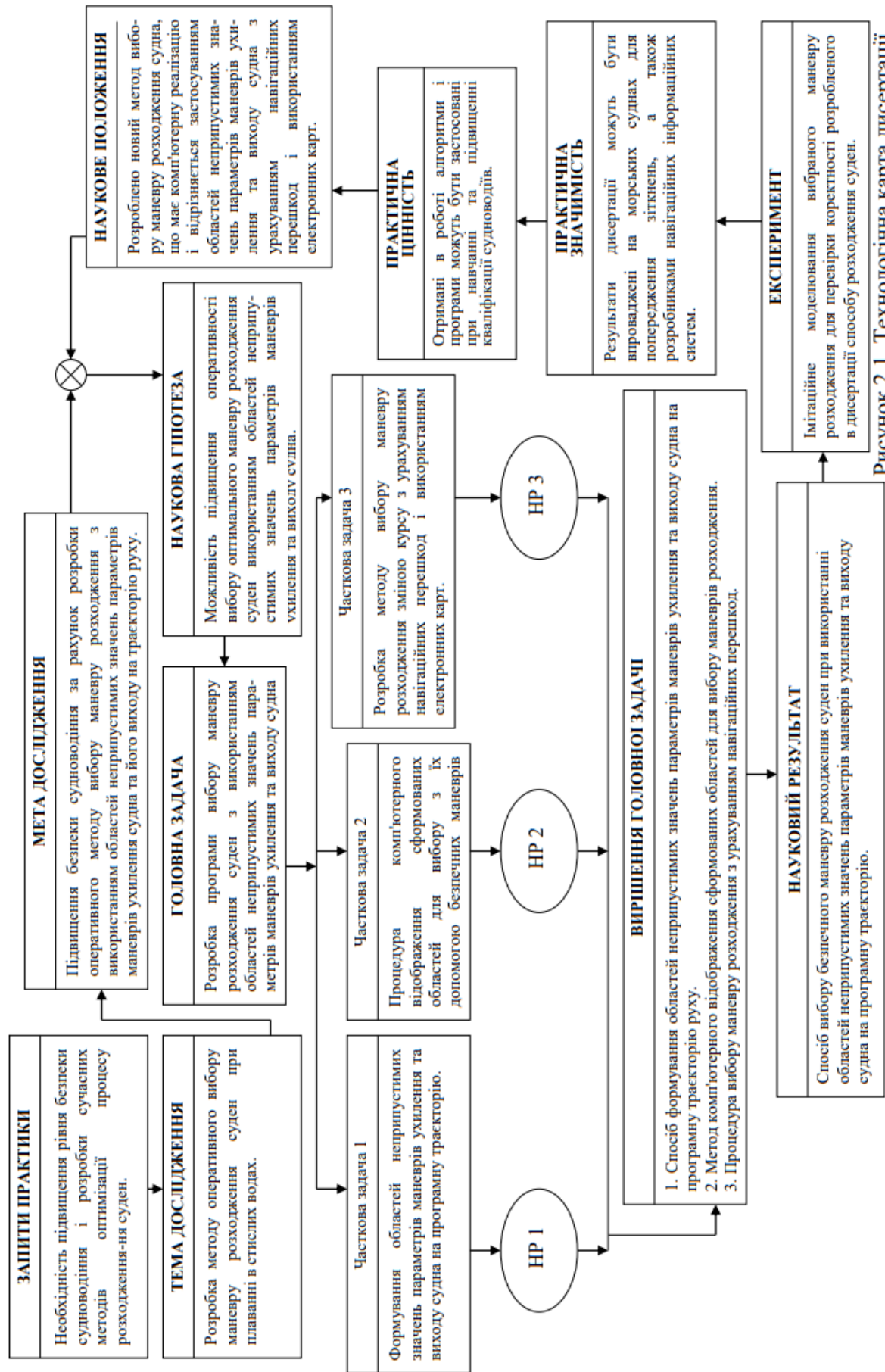


Рисунок 2.1. Технологічна карта дисертації

неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію.

управлінні шляхом використання областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію.

Головна задача дослідження полягає в розробці алгоритмів і програми визначення параметрів маневру розходження суден з використанням областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію.

Для вирішення головної задачі дисертації методами теорії дослідження операцій було проведено її розділення на три незалежні складові задачі:

1. Формування областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху.
2. Процедура комп'ютерного відображення сформованих областей для вибору з їх допомогою безпечних маневрів розходження.
3. Розробка методу вибору маневру розходження зміною курсу з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

Для формалізації першої незалежної складової задачі необхідно, перш за все, знайти аналітичні залежності для меж області неприпустимих значень параметрів маневру ухилення судна для випадку, коли його швидкість перевищує швидкість цілі. У випадку, коли привалює швидкість цілі над швидкістю судна, слід окремо розглянути процедуру визначення аналітичної залежності для меж області. Далі слід здійснити пошук аналітичних залежностей для меж області неприпустимих значень параметрів маневру виходу судна на програмну траєкторію руху. Використання вказаних областей потребує їх відображення на екрані монітору за допомогою комп'ютерної графіки, що ставить задачу розробки комп'ютерної процедури, яка відображає області неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху.

Друга складова задача дисертаційного дослідження потребує розробки процедури комп'ютерного відображення сформованих областей для вибору з

їх допомогою оптимального безпечного маневру розходження зміною курсу судна. Для вирішення вказаної задачі необхідно розробити комп'ютерну програму, що складається із модулів визначення меж областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію та їх відображення на екрані монітору з метою вибору оптимального маневру розходження судна з небезпечною цілю зміною курсів з подальшим його програванням імітаційною програмою.

Третя складова задача дисертаційного дослідження пов'язана з розробкою методу вибору маневру розходження зміною курсу з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт. Її розв'язання можливе під час відображення поточних позицій судна і навколишніх цілей на електронній карті та індикації на ній траєкторії одержаного маневру розходження, що забезпечить безпечне розходження судна з уникненням можливих навігаційних аварій.

Запропонована комп'ютерна програма може бути використана для розробки навігаційної інформаційної системи вибору оптимального маневру розходження судна при його локально-незалежним керуванням процесу розходження.

До складу імітаційної програми повинні входити наступні модулі:

- формування ситуації небезпечного зближення судна та цілі, коли виникає загроза їх зіткнення;
- визначення меж областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію і їх графічного відображення на екрані монітору;
- індикації поточних позицій судна і навколишніх цілей на електронній карті та відображення на ній траєкторії одержаного маневру розходження;
- визначення параметрів оптимального маневру розходження судна зміною його курсу за допомогою областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію;

- імітаційного моделювання вибраного маневру розходження за допомогою комп'ютерної графіки.

Під час вирішенні кожної із складових незалежних задач були отримані наукові результати, які мають новизну та на технологічній карті методологічного забезпечення дисертаційного дослідження позначені відповідно НР1, НР2 і НР3:

- науковий результат першої складової задачі НР1 полягає в розробці способу формування областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху;

- метод комп'ютерного відображення сформованих областей для вибору з їх допомогою безпечних маневрів розходження є науковим результатом НР2 другої складової задачі;

- процедура вибору маневру розходження зміною курсу з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт являється науковим результатом НР3 третьої складової задачі.

Використовуючи розроблену комп'ютерну програму, необхідно провести імітаційне моделювання перевірки результатів дисертаційного дослідження по коректності розроблених способів вибору безпечного маневру розходження судна з ціллю зміною курсу з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

Наукова гіпотеза про можливість підвищення оперативності і коректності визначення параметрів оптимального маневру розходження суден за їх локально-незалежного управління шляхом використання областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію була підтверджена одержаними в дисертаційній роботі теоретичними результатами та імітаційним моделюванням.

Роз має практичне значення, тобто висновки та результати можна впровадити на судах для запобігання зіткнень, а також існує можливість використання розробниками навігаційних інформаційних систем для рекомендацій щодо розходження суден судна в ситуаціях небезпечного зближення.

Одержані в роботі теоретичні результати і програми можуть бути застосовані під час навчання і підвищення кваліфікації судноводіїв, це підкреслює практичну цінність роботи.

Наукові результати, що були одержані в дисертаційному дослідженні, та виконане Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені імітаційне моделювання визначають його наукове положення, яке може бути сформульовано наступним чином:

Розроблено новий метод визначення параметрів маневру розходження судна, що має комп'ютерну реалізацію і відрізняється застосуванням областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

### 2.3 Стислий виклад методики проведення дисертаційного дослідження

Змістом даного підрозділу являється стислий виклад методики проведення дисертаційного дослідження.

Використовуючи рекомендації по організації і проведенню наукових досліджень методами дедукції слід провести аналіз основних напрямків проблеми забезпечення безаварійності судноводіння, чим забезпечується вибір теми дисертаційного дослідження.

Наступним другим кроком виконання роботи являється розділення головної задачі дисертаційного дослідження методами дослідження операцій на незалежні складові задачі, та забезпечення методологічного обґрунтування дисертації.

В подальшому необхідно знайти аналітичні вирази для розрахунку меж області неприпустимих значень параметрів маневру ухилення судна для ситуацій, коли його швидкість більша швидкості цілі. У випадку, коли, навпаки, швидкість цілі перевершує швидкість судна, слід розглянути процедуру визначення аналітичної залежності для визначення меж області. Також необхід-



но здійснити пошук аналітичних залежностей для розрахунку меж області неприпустимих значень параметрів маневру виходу судна на програмну траєкторію руху. Для використання даних областей слід забезпечити їх відображення на екрані монітору за допомогою комп'ютерної графіки, для чого слід розробити комп'ютерну процедуру, що відображає області неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху.

Черговим кроком виконання дисертаційної роботи є розробка методу вибору маневру розходження зміною курсу з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт. Її розв'язання можливе під час відображення поточних позицій судна і навколишніх цілей на електронній карті та індикації на ній траєкторії одержаного маневру розходження, що забезпечить безпечне розходження судна з уникненням можливих навігаційних аварій.

Завершальним етапом роботи є розробка модулю імітаційного моделювання маневру розходження зміною курсу для перевірки коректності способу вибору маневру розходження в заданій ситуації небезпечного зближення.

## 2.4 Висновки за другим розділом

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено вибору теми дослідження і його основним напрямкам. В ньому приведено технологічну карту дослідження, яка містить методологічну структуру дисертаційного дослідження і приведено його методологічне забезпечення.

В технологічній карті вказані мета дисертаційного дослідження і його головна задача, що розділена на три незалежні складові задачі. Приведено формулювання і підтверджено робочу гіпотезу наукового дослідження, показано, що одержано наукові результати дисертаційної роботи, які мають наукову новизну та одержані вперше.



У другому розділі приведені практична цінність і значущість дисертаційного дослідження, що обумовлені можливістю впровадження практичних результатів, запропонованих в дисертаційній роботі, в розділі також сформульовано основне наукове положення роботи.

Окремим підрозділом розглянуто скорочену методику рішення складових задач дослідження, що отримані в дисертаційній роботі, та описує основні етапи виконання наукового дослідження по темі дисертації, вказуючи використання сучасних методів аналітичного аналізу та проведення імітаційного комп'ютерного моделювання для підтвердження коректності запропонованого оперативного способу визначення параметрів безпечних маневрів розходження судна з ціллю зміною курсу.

### РОЗДІЛ 3. АНАЛІТИЧНИЙ ОПИС ОПЕРАЦІЇ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТК- НЕННЯ СУДЕН

Даний розділ містить матеріали і методи, необхідні для вирішення головної задачі дисертаційного дослідження, і в ній запропонований спосіб її рішення в першому наближенні.

#### 3.1 Основні аналітичні залежності між параметрами істинного і відносного руху пари суден

Вибір стратегії розходження судна з небезпечною цілю вимагає визначення безпечних параметрів їх відносного руху, які дозволяють знайти параметри істинного руху базового судна. Для цього необхідні аналітичні вирази, які зв'язують відносні і істинні параметри руху суден.

Розглянемо залежності параметрів відносного руху  $K_{ot}$  і  $V_{ot}$  від параметрів істинного руху  $K_1$ ,  $V_1$ ,  $K_2$  і  $V_2$  суден, тобто  $K_{ot} = f_K(V_1, K_1, V_2, K_2)$  і  $V_{ot} = f_V(V_1, K_1, V_2, K_2)$ . Для цього позначимо проекції сумарної відносної швидкості  $V_{otx}$  і  $V_{oty}$ , як показано на рисунку 3.1.

З рисунку виходить:

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

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

$$V_{ot} = [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos(K_1 - K_2)]^{1/2},$$

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

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

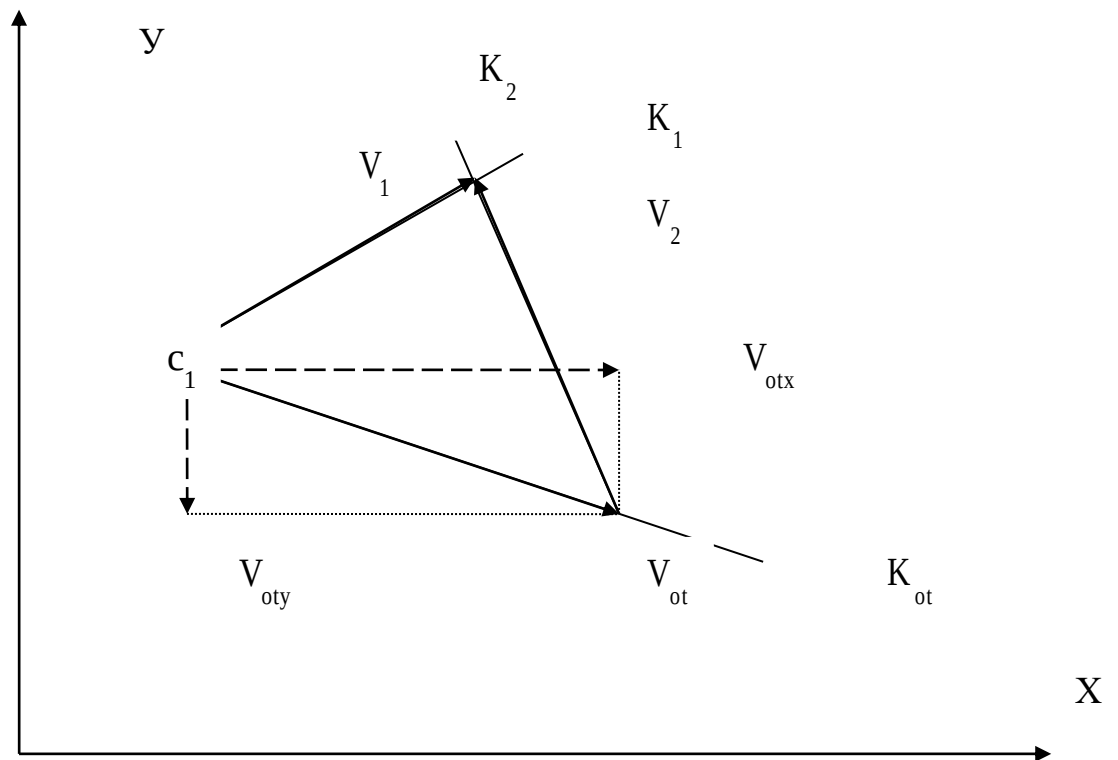


Рисунок 3.1 –Залежність параметрів істинного і відносного руху

Розглянемо закономірності зміни відносного курсу  $K_{ot}$  у випадку зміни істинного курсу одного з суден за незмінного курсу іншого судна. Для цього позначимо істинний курс судна, що виконує поворот, через  $K_o$ , а швидкість -  $V_o$ . Аналогічно для судна, що зберігає незмінний курс, параметри руху позначені  $K_c$  і  $V_c$ .

Знайдемо першу похідну відносного курсу по істинному курсу судна  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  і зробимо її аналіз. Враховуючи вираз (3.1), одержимо:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{\partial \psi}{\partial K_o}.$$

Так як  $\psi = \arcsin\left(\frac{V_{otx}}{\sqrt{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}}\right)$ , то перша похідна цього виразу прий-

має наступний вигляд:

$$\frac{\partial \psi}{\partial K_o} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V_{otx}^2}{(V_{otx}^2 + V_{oty}^2)}}} \frac{\partial}{\partial K_o} \left( \frac{V_{otx}}{\sqrt{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}} \right).$$

Очевидно:

$$\frac{\partial}{\partial K_o} \left( \frac{V_{otx}}{\sqrt{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}} \right) = \frac{\frac{\partial V_{otx}}{\partial K_o} (V_{otx}^2 + V_{oty}^2)^{1/2} - \dot{Y}^2 \frac{\partial}{\partial K_o} [(V_{otx}^2 + V_{oty}^2)^{1/2}]}{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}.$$

Враховуючи, що  $\frac{\partial}{\partial K_o} [(V_{otx}^2 + V_{oty}^2)^{1/2}] = \frac{\frac{\partial V_{otx}}{\partial K_o} V_{otx} + \frac{\partial V_{oty}}{\partial K_o} V_{oty}}{\sqrt{V_{otx}^2 + V_{oty}^2}}$ , і позна-

чаючи  $\frac{\partial V_{otx}}{\partial K_o} = \dot{X}_k$  і  $\frac{\partial V_{oty}}{\partial K_o} = \dot{Y}_k$ , одержимо вираз для шуканої похідної:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{\dot{X}_k (V_{otx}^2 + V_{oty}^2) - V_{otx} (V_{otx} \dot{X}_k + V_{oty} \dot{Y}_k)}{V_{oty} (V_{otx}^2 + V_{oty}^2)},$$

або після перетворень:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{\dot{X}_k V_{oty} - \dot{Y}_k V_{otx}}{V_{otx}^2 + V_{oty}^2},$$

де  $\dot{X}_k = V_o \cos K_o$ ,  $\dot{Y}_k = -V_o \sin K_o$ .

В роботі [9] показано, що

$$(\dot{X}_k V_{oty} - \dot{Y}_k V_{otx}) = V_o [V_o - V_c (\cos K_o \cos K_c - \sin K_o \sin K_c)] =$$

$$V_o [V_o - V_c \cos(K_o - K_c)].$$

Тому

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

звідки витікає, що знак похідної  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  відповідає знаку виразу

$V_o - V_c \cos(K_o - K_c)$ . Тому коли  $V_o > V_c$  вираз  $V_o - V_c \cos(K_o - K_c)$ , як і вели-

чина  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$ , позитивні для всіх значень  $K_o$ . Зміна відносного курсу  $K_{ot}$  пока-

зана на рисунку 3.2.

Очевидно, коли  $V_o > V_c$  відносний курс  $K_{ot}$  може приймати будь-які

значення від 0 до  $2\pi$ . Зокрема відносний курс приймає значення  $K_c + \frac{\pi}{2}$  коли

значенні курсу  $K_o$ , рівного  $K_c + \arccos \rho$ , і значення відносного курсу  $K_c + \frac{3\pi}{2}$

досягається коли  $K_o = K_c - \arccos \rho$ , де прийняте позначення  $\rho = \frac{V_c}{V_o}$ .

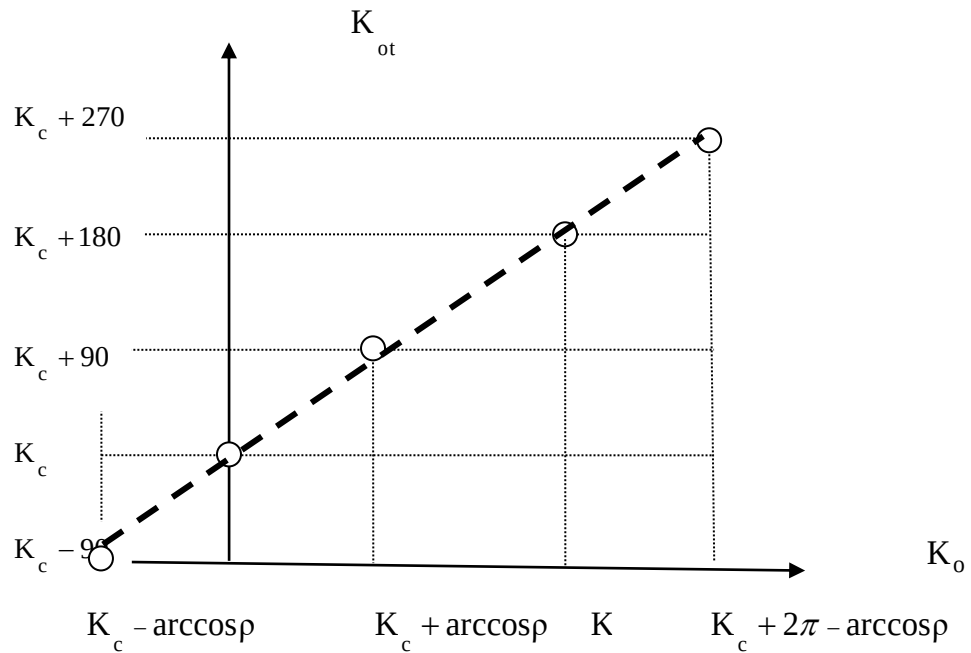


Рисунок 3.2 – Зміна відносного курсу  $K_{ot}$  коли  $V_o > V_c$

Швидкість зміни відносного курсу залежить від значень різниці курсів суден  $\Delta K = K_c - K_o$ . Тому з урахуванням виразу (3.2) одержимо:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{V_o(V_o - V_c \cos \Delta K)}{V_c^2 + V_o^2 - 2 V_c V_o \cos \Delta K}.$$

Звертаємо увагу на те, що екстремальні значення  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  досягаються коли  $\Delta K = 0$  і  $\Delta K = 180$ .

Знайдемо вирази для  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  коли вказані значення  $\Delta K$ .

Для  $\Delta K = 0$  одержимо:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}(\Delta K = 0) = \frac{V_o(V_o - V_c)}{V_c^2 + V_o^2 - 2 V_c V_o} = \frac{V_o(V_o - V_c)}{(V_c - V_o)^2}, \text{ або}$$

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}(\Delta K = 0) = \frac{V_o}{(V_o - V_c)}.$$

У випадку  $\Delta K = 180$  вираз для  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  приймає наступний вигляд:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}(\Delta K = 180) = \frac{V_o(V_o + V_c)}{V_c^2 + V_o^2 + 2 V_c V_o} = \frac{V_o(V_c + V_o)}{(V_c + V_o)^2}, \text{ остаточно}$$

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}(\Delta K = 180) = \frac{V_o}{(V_c + V_o)}.$$

З одержаних виразів виходить, що максимальна швидкість зміни  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$

досягається коли  $\Delta K = 0$ , а мінімальна – коли  $\Delta K = 180$ .

У випадку  $V_o < V_c$ , тобто швидкість судна, що маневрує, менше швидкості іншого судна, вираз  $V_o - V_c \cos(K_o - K_c)$  і перша похідна  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  може мати як позитивне, так і від'ємне значення, а область значень  $K_{ot}$  обмежується екстремальними значеннями, які позначимо  $K_{otmin}$  і  $K_{otmax}$ .

Під час зростання курсу, залежно від його поточного значення відносний курс  $K_{ot}$  може, як збільшуватися, так і зменшуватися. Так, під час зростання курсу  $K_o$  від значення  $K_{omin}$  до значення  $K_{omax}$  через  $K_c + 180$  значення відносний курс  $K_{ot}$  також збільшується від величини  $K_{otmin}$  до значення  $K_{otmax}$ . Отже, коли  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} > 0$ , то  $K_o \in [K_{omin}, K_{omax}]$ . За подальшого збільшення курсу  $K_o$  від  $K_{omax}$  до  $K_{omin}$  через значення  $K_c$  відносний курс  $K_{ot}$

зменшується, тобто  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} < 0$ . Екстремальним значенням відносних курсів

$K_{otmin}$  і  $K_{otmax}$  відповідають курси судна  $K_{1min}$  і  $K_{1max}$ , які знаходяться з

умови рівності першої похідної  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  нулю, тобто з рівняння:

$$V_o - V_c \cos(K_o - K_c) = 0 \quad \text{или} \quad \cos(K_o - K_c) = \frac{V_o}{V_c} = \rho.$$

Дане рівняння має два рішення:

$$K_{o1} = K_c + \arccos \rho, \quad K_{o2} = K_c - \arccos \rho. \quad (3.3)$$

Необхідно визначити відповідність набутих значень курсів  $K_{o1}$  і  $K_{o2}$  судна, що маневрує, екстремальним відносним курсам  $K_{otmin}$  і  $K_{otmax}$ . Ця невідомість зникає під час перевірки знаків екстремумів другої похідної.

З урахуванням того, що у відносному переміщенні нерухомим вибране судно з постійними параметрами руху, в книзі [9] приведені вирази для екстремальних відносних курсів  $K_{otmin}$  і  $K_{otmax}$ :

$$K_{otmin} = \pi + K_2 - \arcsin \rho,$$

$$K_{otmax} = \pi + K_2 + \arcsin \rho,$$

а відповідні їм значення згідно (3.3):

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

$$K_{omax} = K_c - \arccos \rho.$$



Отже, за змінюючого курсу  $K_o$  судна, що маневрує, в діапазоні від 0 до  $2\pi$  відносний курс  $K_{ot}$  прийматиме значення з діапазону  $[K_{otmin}, K_{otmax}]$ , як показано на рисунку 3.4.

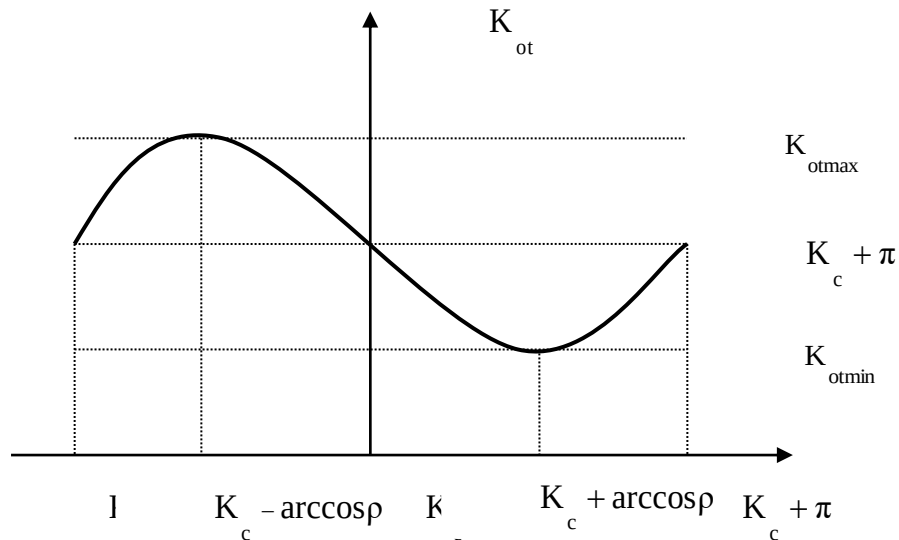


Рисунок 3.4 – Залежність відносного курсу  $K_{ot}$  від курсу  $K_o$  коли  $V_o < V_c$

У разі, коли швидкості суден рівні, тобто  $V_o = V_c$ , то залежність відносного курсу  $K_{ot}$  від курсу  $K_o$  судна, що маневрує, представлена на рисунку 3.5. З рисунку виходить, що під час зміни курсу судна  $K_o$  від 0 до  $2\pi$  відносний курс приймає значення  $K_{ot} \in [K_c + \pi/2, K_c + 3\pi/2]$ , зважаючи на те, що коли  $K_o = K_c$  відносний курс  $K_{ot}$  стрибкоподібно змінюється на  $180^\circ$ .

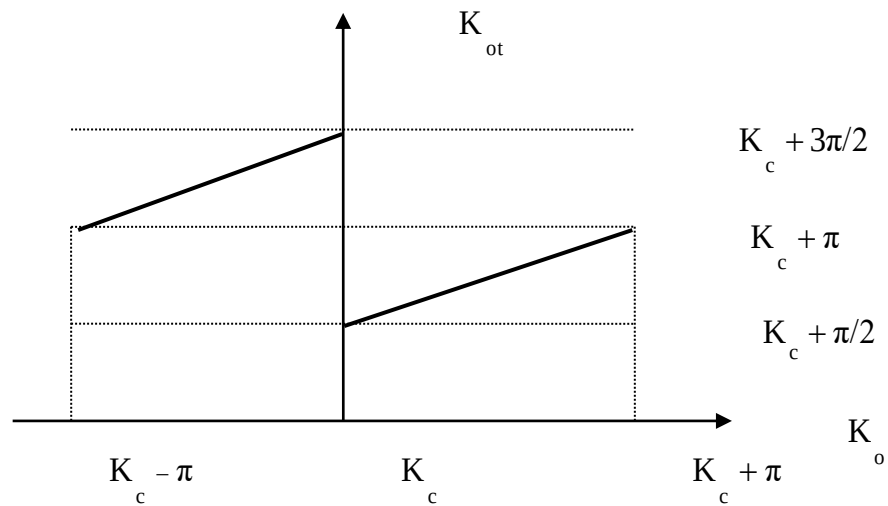


Рисунок 3.5 – Залежність відносного курсу  $K_{ot}$  від курсу  $K_o$  коли  $V_o = V_c$

Знайдемо аналітичний вираз залежності істинного курсу  $K_o$  від відносного курсу  $K_{ot}$ . Для цього використовуємо вираз з роботи [130]:

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_o \sin K_o - V_c \sin K_c}{V_o \cos K_o - V_c \cos K_c},$$

де  $V_o$  і  $K_o$  - параметри рухомого у відносному русі судна;

$V_c$  і  $K_c$  - параметри нерухомого у відносному русі судна.

З останнього виразу одержимо:

$$\operatorname{tg} K_{ot} (V_o \cos K_o - V_c \cos K_c) = V_o \sin K_o - V_c \sin K_c,$$

звідки

$$V_o \cos K_o \operatorname{tg} K_{ot} - V_c \cos K_c \operatorname{tg} K_{ot} = V_o \sin K_o - V_c \sin K_c,$$

$$V_o \cos K_o \operatorname{tg} K_{ot} - V_o \sin K_o = V_c \cos K_c \operatorname{tg} K_{ot} - V_c \sin K_c,$$

або

$$V_o(\cos K_o \operatorname{tg} K_{ot} - \sin K_o) = V_c(\cos K_c \operatorname{tg} K_{ot} - \sin K_c).$$

Умножаємо обидві частини останнього рівняння на -1 і одержимо:

$$V_o(\sin K_o - \cos K_o \operatorname{tg} K_{ot}) = V_c(\sin K_c - \cos K_c \operatorname{tg} K_{ot}).$$

Перепишемо останній вираз у вигляді:

$$\sin K_o - \cos K_o \operatorname{tg} K_{ot} = \rho^{-1}(\sin K_c - \cos K_c \operatorname{tg} K_{ot}),$$

$$\text{де } \rho = \frac{V_o}{V_c}.$$

Помножимо останню рівність на  $\cos K_{ot}$ , одержимо:

$$\sin K_o \cos K_{ot} - \cos K_o \sin K_{ot} = \rho^{-1}(\sin K_c \cos K_{ot} - \cos K_c \sin K_{ot}),$$

або з урахуванням елементарних залежностей знаходимо:

$$\sin(K_o - K_{ot}) = \rho^{-1} \sin(K_c - K_{ot}).$$

Дане рівняння, вирішуване відносно  $K_o$ , має два рішення:

$$K_{o1} = K_{ot} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - K_{ot})],$$

(3.4)

$$K_{o2} = K_{ot} + \pi - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - K_{ot})].$$

(3.5)

Одне з одержаних рішень має місце коли  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} > 0$ , а інше – в протилежному випадку. Тому слід встановити відповідність між значеннями знаку виразу  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  і одержаним корінням  $K_{o1}$  і  $K_{o2}$ . Для цього необхідно визначити знаки похідних  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}}$  і  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}}$ .

Спочатку знайдемо вираз для похідної  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}}$ , для чого рівняння (3.4) диференціюємо по змінній  $K_{o1}$ :

$$1 = \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}} + \frac{\rho^{-1} \cos(K_c - K_{ot})}{\sqrt{1 - \rho^{-2} \sin^2(K_c - K_{ot})}} \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}}, \text{ або}$$

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}} = \left[ 1 + \frac{\rho^{-1} \cos(K_c - K_{ot})}{\sqrt{1 - \rho^{-2} \sin^2(K_c - K_{ot})}} \right]^{-1} = (1 + q)^{-1},$$

$$\text{де } q = \frac{\rho^{-1} \cos(K_c - K_{ot})}{\sqrt{1 - \rho^{-2} \sin^2(K_c - K_{ot})}}.$$

Отже,

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}} = (1 + q)^{-1}.$$

Аналіз виразу для  $q$  показує, що коли  $\rho > 1$  модуль значення  $q$  не перевершує 1 незалежно від значень решти змінних. Отже, незалежно від знаку  $q$  справедлива рівність  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o1}} > 0$ .

Знайдемо вираз для похідної, з цією метою рівняння (3.5) диференціюємо по  $K_{o2}$ :

$$1 = \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}} - \frac{\rho^{-1} \cos(K_c - K_{ot})}{\sqrt{1 - \rho^{-2} \sin^2(K_c - K_{ot})}} \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}}, \text{ або}$$

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}} = \left[ 1 - \frac{\rho^{-1} \cos(K_c - K_{ot})}{\sqrt{1 - \rho^{-2} \sin^2(K_c - K_{ot})}} \right]^{-1} = (1 - q)^{-1}, \text{ тому}$$

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}} = (1 - q)^{-1}. \quad (3.6)$$

У випадку  $\rho < 1$  курси судна в інтервалі від  $K_c - \arccos \rho$  до  $K_c + \arccos \rho$ , за яких  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} < 0$ , називатимемо попутними, а інші, для яких  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} > 0$ , - зустрічними.

Аналіз виразу (3.6) показує, що  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_{o2}} < 0$  у випадку  $\rho < 1$  і коли проходженні судна попутними курсами. Звертаємо увагу, що за попутних курсів відносне ухилення  $\Delta$  від'ємне, тобто зі збільшенням курсу судна відносний курс зменшується і навпаки. Зустрічні курси характеризуються позитивним значенням  $\Delta$ .

Отже, коли  $V_o > V_c$  має місце  $\rho > 1$  і існує однозначне відображення відносних курсів в множину істинних курсів судна, оскільки знак першої похідної  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} > 0$  для всіх значень курсу судна, зважаючи на те, що залежність має наступний вигляд:

$$K_o = K_{ot} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - K_{ot})].$$

У випадку  $V_o < V_c$  значення  $\rho < 1$  відображення множини відносних курсів в множину істинних курсів судна не є однозначним, оскільки перша похідна  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}$  може мати як позитивний, так і від'ємний знаки, тобто кожному відносному курсу, окрім екстремальних, відповідає два значення  $K_{o1}$  і  $K_{o2}$  істинного курсу.

Зважаючи на те, що справедливе співвідношення:

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

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

У разі, коли швидкості суден рівні  $V_o = V_c$ , тобто  $\rho = 1$ , одержимо:

$$K_o = 2K_{ot} + \pi - K_c.$$

Узагальнюючи одержані результати, для судна, що маневрує, справедливий вираз для розрахунку істинного курсу  $K_o$  :

$$K_o = \begin{cases} K_{ot} + \arcsin[p^{-1}\sin(K_c - K_{ot})], & V_o > V_c; \\ K_{ot} + \arcsin[p^{-1}\sin(K_c - K_{ot})], & V_o < V_c, \Delta > 0; \\ K_{ot} + \pi - \arcsin[p^{-1}\sin(K_c - K_{ot})], & V_o < V_c, \Delta < 0; \\ K_{ot} + \pi - K_c, & V_o = V_c. \end{cases}$$

(3.7)

Розглянемо вплив зміни швидкості судна на величину відносного курсу. Для пошуку першої похідної відносного курсу  $\partial K_{ot}$  по швидкості судна (наприклад, першого  $V_1$ ), тобто  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1}$ , скористаємося виразом (3.1):

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2},$$

яке можна представити Отже:

$$\operatorname{tg} K_{ot} (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) = V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2.$$

Розкриваючи дужки і групуючи подібні члени, одержимо:

$$V_1 (\operatorname{tg} K_{ot} \cos K_1 - \sin K_1) = V_2 (\operatorname{tg} K_{ot} \cos K_2 - \sin K_2).$$

Остаточно залежність  $V_1$  від  $K_{ot}$  приймає вигляд:

$$V_1 = V_2 \frac{\operatorname{tg} K_{ot} \cos K_2 - \sin K_2}{\operatorname{tg} K_{ot} \cos K_1 - \sin K_1}. \quad (3.8)$$

У чисельнику і знаменнику одержаного виразу (3.8) проведемо амплітудно - фазове перетворення. Розглянемо вираз в чисельнику:

$$\operatorname{tg}K_{\text{от}} \cos K_2 - \sin K_2 = A \left( \frac{\operatorname{tg}K_{\text{от}}}{A} \cos K_2 - \frac{1}{A} \sin K_2 \right).$$

Виберемо приведену амплітуду, рівну:

$$A = (\operatorname{tg}K_{\text{от}} + 1)^{1/2},$$

тоді справедливі співвідношення  $\frac{\operatorname{tg}K_{\text{от}}}{A} = \sin \psi$ ,  $\frac{1}{A} = \cos \psi$  і, отже, можна записати:

$$\operatorname{tg}K_{\text{от}} \cos K_2 - \sin K_2 = -A \sin(K_2 - \psi),$$

де  $\psi = \arctg(\operatorname{tg}K_{\text{от}}) = K_{\text{от}}$ .

Аналогічно знаменник виразу (3.8) приймає вигляд:

$$\operatorname{tg}K_{\text{от}} \cos K_1 - \sin K_1 = -A \sin(K_1 - \psi),$$

отже, рівняння (3.8):

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

або остаточно:



$$V_1 = V_2 \frac{\sin(K_2 - K_{ot})}{\sin(K_1 - K_{ot})}. \quad (3.9)$$

Останню рівність запишемо у вигляді:

$$V_1 \sin(K_1 - K_{ot}) = V_2 \sin(K_2 - K_{ot}).$$

Диференціюємо його по змінній  $V_1$ :

$$\frac{\partial}{\partial V_1} [V_1 \sin(K_1 - K_{ot})] = \frac{\partial}{\partial V_1} [V_2 \sin(K_2 - K_{ot})].$$

Справедливо наступне співвідношення:

$$\sin(K_1 - K_{ot}) - V_1 \cos(K_1 - K_{ot}) \frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1} = -V_2 \cos(K_2 - K_{ot}) \frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1} \quad \text{або}$$

$$\sin(K_1 - K_{ot}) = [V_1 \cos(K_1 - K_{ot}) - V_2 \cos(K_2 - K_{ot})] \frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1}.$$

З останнього рівняння виходить:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1} = \frac{\sin(K_1 - K_{ot})}{V_1 \cos(K_1 - K_{ot}) - V_2 \cos(K_2 - K_{ot})}.$$

Перетворимо одержану рівність:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1} = \frac{\sin K_1 \cos K_{ot} - \cos K_1 \sin K_{ot}}{V_1(\cos K_1 \cos K_{ot} + \sin K_1 \sin K_{ot}) - V_2(\cos K_2 \cos K_{ot} + \sin K_2 \sin K_{ot})}. \quad (3.10)$$

Підставляємо в одержане рівняння виразу для  $\sin K_{ot}$  і  $\cos K_{ot}$ . В цьому випадку чисельник приймає вигляд:

$$\begin{aligned} & \sin K_1 \cos K_{ot} - \cos K_1 \sin K_{ot} = \\ & \sin K_1 (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) - \cos K_1 (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) = \\ & V_1 \cos K_1 \sin K_1 - V_2 \cos K_2 \sin K_1 - V_1 \sin K_1 \cos K_1 + V_2 \sin K_2 \cos K_1 = \\ & -V_2 \cos K_2 \sin K_1 + V_2 \sin K_2 \cos K_1 = -V_2 \sin(K_1 - K_2). \end{aligned}$$

Перетворимо вираз для знаменника виразу (3.10):

$$\begin{aligned} & V_1(\cos K_1 \cos K_{ot} + \sin K_1 \sin K_{ot}) - V_2(\cos K_2 \cos K_{ot} + \sin K_2 \sin K_{ot}) = \\ & V_1[\cos K_1 (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) + \sin K_1 (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)] - \\ & - V_2[\cos K_2 (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) + \sin K_2 (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)] = \\ & V_1^2 \cos^2 K_1 - V_1 V_2 \cos K_1 \cos K_2 + V_1^2 \sin^2 K_1 - V_1 V_2 \sin K_1 \sin K_2 - \\ & - V_1 V_2 \cos K_2 \cos K_1 + V_2^2 \cos^2 K_2 - V_1 V_2 \sin K_1 \sin K_2 + V_2^2 \sin^2 K_2]. \end{aligned}$$

Групуємо члени в последнем выражении и получим:

$$V_1^2 - 2V_1 V_2 \cos K_1 \cos K_2 - 2V_1 V_2 \sin K_1 \sin K_2 + V_2^2.$$

Отже, шукана похідна  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1}$  має наступний вигляд:

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

Позначаючи, остаточно одержимо:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial V_1} = \frac{-V_2 \sin \Delta K}{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K}. \quad (3.11)$$

Отже, відносний курс не змінюється зі зміною швидкості суден, якщо їх різниця курсів рівна нулю або 180 градусам.

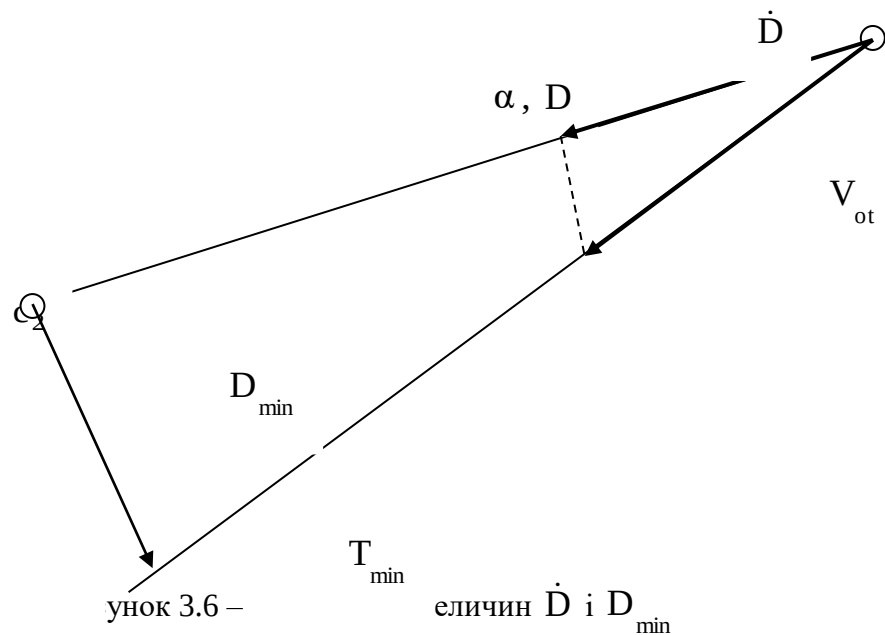
### 3.2 Вибір маневру за стандартного і екстреного розходження суден в ситуації небезпечного зближення

Попередження зіткнення вимагає прогнозу значення дистанції найкоротшого зближення  $D_{min}$  (рис. 3.6), яке зіставляється з величиною гранично - допустимою дистанцією, яка забезпечує безпечну розходження.

З рисунку виходить:

$$D_{min} = \Delta_n D \sin(K_{ot} - \alpha), \quad (3.12)$$

де  $\Delta_n$  - співмножник, що забезпечує позитивне значення  $D_{min}$ .



Першою ознакою можливого зіткнення суден є їх зближення. Враховуючи, що у відносному русі нерухомим є судно, то за допомогою рисунку 3.6 одержимо:

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

Звертаємо увагу, що під час зближенні суден, що справедливо коли  $0 \leq \alpha - K_{ot} < \pi/2$ . Оскільки рівність  $\alpha - K_{ot} = \pi/2$  має місце у момент часу  $t = T_{\min}$ , то до моменту часу  $T_{\min}$  знак  $\dot{D}$  є незмінним.

Вважаючи, що швидкості суден  $V_o$  і  $V_c$  є незмінними, в роботі [1] одержана залежність швидкості  $\dot{D}$  від курсів суден  $K_o$  і  $K_c$ :

$$\dot{D} = V_c \cos(K_c - \alpha) - V_o \cos(K_o - \alpha).$$

З кожним із суден зв'язується двовимірний простір неприпустимих позицій, звана судновою безпечною областю, в якій небажане перебування яких-небудь сторонніх об'єктів і яка повинна бути сформована так, щоб її межа

відповідала нульовій вірогідності зіткнення. Кожній крапці усередині цієї області відповідає деяка відмінна від нуля вірогідність виникнення зіткнення, зважаючи на те, що зростання вірогідності зіткнення суден відбувається з скороченням найкоротшої дистанції між суднами.

Під час прогнозованого попадання суден в область неприпустимих позицій виникає ситуативне збурення  $\omega$ , яке виявляє можливу небезпечну позицію завчасно, прогножуючи зміни відносної позиції пари суден. Тому воно носить умовний характер і виникає тоді, коли прогнозоване значення дистанції найкоротшого зближення  $D_{\min}$  менше значення гранично - допустимої дистанції зближення  $D_d$ .

Ще однією характеристикою ситуативного збурення є час запасу, який характеризує інтервал часу до настання рівності максимальної дистанції найкоротшого зближення  $\max D_{\min}$  і гранично - допустимої дистанції  $D_d$ . Ситуативне збурення  $\omega$  може приймати три значення [130]:

$$\omega = \begin{cases} 0, & D_{\min} > D_d, \\ 1, & D_{\min} \leq D_d, t_{z_{ij}} > 0, \\ 2, & D_{\min} \leq D_d, t_{z_{ij}} \leq 0. \end{cases} \quad (3.13)$$

Для декомпозиції множин станів небезпечного зближення суден на підмножини ситуативних збурень із значеннями 1 і 2 враховуємо співвідношення значень  $\max D_{\min}$  і  $D_d$ . Зміна значень ситуативного збурення відбувається на межі, коли досягається рівність  $\max D_{\min} = D_d$ . У випадку  $V_o > V_c$  судно, що маневрує, може зміною свого курсу забезпечити будь-який відносний курс, тому без урахування інерційності судна в першому наближенні максимальна дистанція найкоротшого зближення  $\max D_{\min}$  рівна дистанції між судами  $D$ . Отже, в цьому випадку  $\max D_{\min} = D$ . Якщо ж, то величина  $\max D_{\min}$  визначається з очевидного виразу:

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

де  $\alpha$  - пеленг на ціль.

У свою чергу, екстремальний відносний курс  $K_{\text{extr}}$  рівний  $K_{\text{otmin}}$  або  $K_{\text{otmax}}$ , на якому дистанція найкоротшого зближення  $D_{\min}$  максимальна, то, очевидно, справедливі наступні дві рівності:

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

При цьому:

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

де  $\rho = V_o / V_c$ .

Очевидно, справедливий вираз:

$$\max D_{\min} = \max[\max D_{\min}^{(\text{mx})}, \max D_{\min}^{(\text{mn})}]. \quad (3.14)$$

Якщо згідно виразу (3.13) ситуативне збурення  $\omega = 1$ , то, як вказується в роботі [9], для його компенсації використовується стандартний маневру розходження зміною курсу, який містить дві ділянки: ділянка ухилення з програмної траєкторії руху, який характеризується курсом ухилення  $K_y$  і моментом часу початку ухилення  $t_y$ , а також ділянка виходу на задану (програмну) траєкторію руху з параметрами  $K_b$  – курсом виходу і  $t_b$  – моментом повороту на курс виходу. Завершальною характеристикою маневру розходження є

час  $t_k$  і курс  $K_k$  повороту судна з ділянки виходу на програмну траєкторію і кінцевий програмний курс.

Якщо в районі маневрування судна є тільки одна програмна ділянка руху, то, очевидно,  $K_k$  рівний початковому програмному курсу  $K_0$ . У разі, коли маневрування відбувається в районі зміни програмної траєкторії руху, величина курсу  $K_k$  може приймати одне з двох можливих значень програмних курсів. Наступною дуже важливою характеристикою маневру розходження є форма його абсолютної траєкторія руху, яку позначимо через  $\delta$ , зважаючи на те, що  $\delta = (\delta_y, \delta_b)$ , де  $\delta_y$  і  $\delta_b$  – відповідно характеристики ділянок ухилення і виходу маневру розходження в істинному русі суден. Величини  $\delta_y$  і  $\delta_b$  приймають одне із значень 1 або  $-1$ , зважаючи на те, що :

$$\delta_y = 1, \text{ коли ухилення судна вправо;}$$

$$\delta_y = -1, \text{ коли ухилення судна вліво.}$$

Очевидно, що значення  $\delta_b$  завжди протилежне по знаку значенню  $\delta_y$ , тобто  $\delta_b = -\delta_y$ .

Умовимося називати базовим судно, з позицій якого розглядається процес розходження. На рисунку 3.7 показана абсолютна траєкторія розходження судна коли  $\delta_y = 1$ .

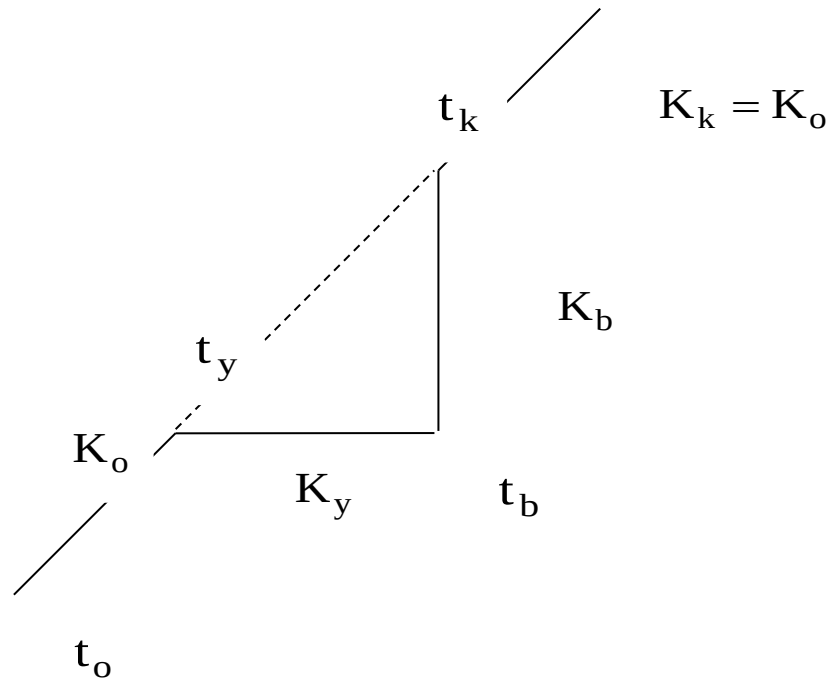


Рисунок 3.7 – Структура маневру розходження коли  $\delta_y = 1$

Множина курсів ухилення  $K_y$  має межі  $K_{y*}$  і  $K_y^*$ , а множина моментів часу початку ухилення  $t_y$  характеризується межами  $t_{y*}$  і  $t_y^*$  - відповідно нижньою і верхньою межею. У свою чергу, параметри  $t_b$  і  $K_b$  ділянки виходу на програмну траєкторію залежать від параметрів ухилення характеризуються межами  $t_{b*}$ ,  $t_b^*$  і  $K_b^*$  - відповідно нижні і верхні межі часу і курсу повороту базового судна у бік програмної траєкторії. Очевидно, що параметри  $t_k$  і  $K_k$  є залежними від інших і визначаються тільки умовою виходу судна на задану траєкторію після завершення розходження, тому не має сенсу шукати їх граничні значення.

У випадку, якщо значення ситуативного збурення  $\omega = 2$ , то застосовується стратегія екстреного розходження, структура якої детально розглянута в роботі [69]. Стратегія екстреного розходження передбачає маневрування судна зміною курсу з моменту виявлення ситуації надмірного зближення до



моменту виходу на програмну траєкторію руху. Слідуючи роботі [69], дамо коротку характеристику структури стратегії екстреного розходження.

У нульовий момент часу (момент виявлення ситуації надмірного зближення) судно, згідно мінімаксній стратегії, яка припускає найнесприятливіший маневр ухилення цілі, повинне лягти на курс, рівний зворотному пеленгу на ціль, тобто  $K_\alpha = \alpha + 180$ , де  $\alpha$  - пеленг на ціль. При цьому поворот на вказаний курс проводиться убік від напрямку на ціль з максимальною кутовою швидкістю. Даний етап стратегії розходження можна назвати мінімізацією швидкості зближення з цілю.

У випадку, якщо швидкість судна перевершує швидкість цілі, тобто  $V_o > V_c$ , то дистанція між судном і цілю збільшується і загроза зіткнення зникає. Інакше ( $V_o \leq V_c$ ) дистанція скорочується з мінімальною швидкістю і максимально збільшується час найкоротшого зближення, що дає можливість цілі зробити маневр безпечного розходження. У будь-якому випадку, якщо ціль навмисно не прагнути до зіткнення, а судно зробить запропонований маневр, дистанція між судном і цілю почне збільшуватися. Коли вона досягне гранично - допустимого значення, судно може лягти на курс, за якого дистанція найкоротшого зближення не зменшується і відбувається зближення з програмною траєкторією руху. Надалі вважатимемо, що швидкість цілі  $V_c$  перевершує швидкість судна, тобто  $V_c > V_o$ .

На даному етапі необхідно уникнути ситуації надмірного зближення, змінюючи позицію судна відносно цілі так, щоб судно опинилося в ситуації, що забезпечує безпечне зближення і рух судна до програмної траєкторії руху.

Отже, після повороту на курс  $K_\alpha$ , коли максимально можлива дистанція найкоротшого зближення  $\max D_{\min}$  не перевершує гранично-допустиму дистанцію  $D_d$ , тобто  $\max D_{\min} \leq D_d$ , судно слідує курсом  $K_\alpha = \alpha + 180$ , зважаючи

на те, що цей курс змінюється із зміною пеленгу, оскільки відбувається переміщення цілі відносно судна, а дистанція між судном і цілю в загальному випадку збільшується.

Оскільки з моменту часу початку одвороту судна від початкового програмного курсу пеленг  $\alpha$  і дистанція  $D$  змінюються, то у момент часу  $t_{on}$  досягнення курсу судна значення курсу «тікання»  $K_\alpha$  необхідно оцінити поточну відносну позицію. Для цього слід за допомогою формули (3.14) обчислити максимально можливу дистанцію найкоротшого зближення  $\max D_{min}$ . Потім належить перевірити справедливість нерівності  $\max D_{min} \leq D_d$ . Якщо рівність справедлива, то належить слідувати курсом «тікання», утримуючи курс судна протилежним пеленгу на ціль, прагнучи збільшити дистанцію до цілі. При цьому належить контролювати співвідношення  $\max D_{min} \leq D_d$ . За справедливості даної нерівності судно продовжує слідувати курсом  $K_\alpha$  до тих пір, поки максимально можлива дистанція найкоротшого зближення  $\max D_{min}$  не стане рівній дистанції  $D_d$ , тобто  $\max D_{min} = D_d$ . Момент часу настання цієї події позначимо  $t_{ok}$ . В даний момент часу необхідно змінити курс судна на величину, за якої досягається екстремальне значення відносного курсу і максимальне значення дистанції найкоротшого зближення. Раніше було показано, що екстремальні відносні курси  $K_{otmin}$  і  $K_{otmax}$  досягаються відповідно за курсів судна:

$$K_{o min} = K_2 + \arccos(\rho) \quad \text{і} \quad K_{o max} = K_2 - \arccos(\rho).$$

Вибираючи одним з вказаних курсів, судно переміщається у бік цілі, зважаючи на те, що дистанція  $D$  між судном і цілю скорочується, і проводиться контроль нерівності  $D_{min} \leq D_d$ . Якщо нерівність справедлива, то суд-

но продовжує слідувати екстремальним курсом. У момент часу, коли нерівність перетвориться в рівність, перевіряємо, чи не досягла дистанція між судном і цілю значення, тобто справедливність рівності  $D = D_d$ . Якщо рівність дотримується, то реалізувався момент часу  $t_b$ , і є можливість лягти на курс виходу на програмну траєкторію  $K_b$ , зважаючи на те, що ділянка виходу на програмну траєкторію руху судна розташована під кутом  $\gamma = 30^\circ - 40^\circ$  до програмної траєкторії, тобто  $K_b = K_n \pm \gamma$ , де  $K_n$  - початковий курс судна. Судно слідує курсом виходу  $K_b$  до тих пір, поки не досягає програмної траєкторії, після чого лягає на початковий курс  $K_n$ , переміщаючись по програмній траєкторії.

Якщо ж рівність  $D = D_d$  не виконується, тобто судно не досягло моменту повороту до програмної траєкторії  $t_b$ , то йому слід лягти на курс ухилення  $K_y$ , який згідно [130] розраховується по формулі:

$$K_y = K_{oty} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - K_{oty})], \quad (3.15)$$

де  $K_{oty}$  - відносний курс ухилення, який визначається з виразу:

$$K_{oty} = \alpha_y + \arcsin\left(\frac{D_d}{D_y}\right),$$

зважаючи на те, що  $\alpha_y$  і  $D_y$  - відповідно пеленг і дистанція у момент часу  $t_{ok}$ .

Якщо у момент часу  $t_{on}$  досягнення курсу судна значення курсу «тікання»  $K_\alpha$  має місце нерівність  $\max D_{\min} \geq L_d$ , то необхідно перевірити можливість виходу судна на програмну траєкторію курсом, для чого належить здійснити контроль зміни дистанції під час проходження цим курсом. Якщо дистанція збільшується, то судно може виходити на задану траєкторію. Інакше зі

зменшенням дистанції необхідно розрахувати дистанцію найкоротшого зближення  $D_{\min b}$  під час проходження курсом  $K_b$  з позиції у момент часу  $t_{on}$ . Якщо справедлива нерівність  $D_{\min b} \geq L_d$ , то судно реалізує ділянку виходу судна на програмну траєкторію. Якщо ж нерівність не виконується, то слід розрахувати курс ухилення  $K_y$ , за якого дистанція найкоротшого зближення  $D_{\min}$  рівна гранично - допустимій дистанції, тобто  $D_{\min} = D_d$ . Розрахунок курсу ухилення  $K_y$  проводиться по формулі (3.15), за умови, що пеленг і дистанція визначаються на момент часу  $t_{on}$ .

Враховуючи вищевикладене, визначимо структуру стратегії екстреного розходження з урахуванням поведінки цілі в процесі розходження у разі, коли швидкість судна менше швидкості цілі.

Першим етапом стратегії екстреного розходження є вихід в позицію мінімізації швидкості зближення. Цей етап триває з початкового моменту виявлення ситуації надмірного зближення до виходу судна на курс мінімізації швидкості зближення, рівний зворотному пеленгу на ціль. Параметрами першого етапу є сторона повороту судна, кінцевий курс перехідного процесу, лінійна швидкість судна і кутова швидкість повороту.

Другим етапом є рух судна курсом мінімізації швидкості зближення до виходу в позицію початку доцільного руху по виконанню функціонального призначення у бік програмної траєкторії.

Зважаючи на те, що з цієї позиції залежно від маневрування цілі рух судна можливий різними курсами, або екстремальним курсом  $K_{extr} = (K_{o \max}, K_{o \min})$ , або курсом ухилення, або курсом виходу  $K_b$ . Тому розрізнятимемо наступні етапи руху судна до програмної траєкторії руху: третій етап руху екстремальним курсом, четвертий етап руху курсом ухилення і п'ятий етап виходу на програмну траєкторію руху.

Структура стратегії екстреного розходження є послідовністю етапів руху з моменту ідентифікації ситуації надмірного зближення до моменту повернення судна на програмну траєкторію руху. Аналіз вищевикладеного показує, що перший і п'ятий етапи обов'язково містяться у всіх типах структури стратегії екстреного розходження. У загальному випадку можливі чотири типи структури  $S_i$  стратегії екстреного розходження з різним набором етапів, які приведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

| Склад структури стратегії екстреного розходження |                               |
|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| Типи структури екстреної стратегії $S$           | Послідовність етапів $G$      |
| $S_1$                                            | $\{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$ |
| $S_2$                                            | $\{G_1, G_3, G_4, G_5\}$      |
| $S_3$                                            | $\{G_1, G_4, G_5\}$           |
| $S_4$                                            | $\{G_1, G_5\}$                |

Перший етап  $G_1$  відповідає перехідному процесу з початкового курсу до виходу судна на курс рівний  $K_\alpha = \alpha + 180$ . Другий етап екстреного ухилення  $G_2$  передбачає проходження судна курсом  $K_\alpha$  до закінчення етапу. Черговий третій етап екстремального ухилення  $G_3$  забезпечує проходження судна екстремальними курсами під час зближення з цілю на зустрічних курсах. Етап стандартного ухилення  $G_4$  (четвертий) передбачає зближення з цілю на найкоротшу дистанцію, рівну гранично - допустимій  $D_d$ . І, нарешті, п'ятий етап, етап виходу на задану траєкторію завершує стратегію розходження.

Якщо структура стратегії екстреного розходження залежить від поведінки цілі в ситуації зближення і траєкторія руху судна в процесі розходження не може бути прогнозованою, то траєкторія істинного руху під час стандартного

маневру розходження прогнозована і її форма визначається існуючою системою бінарної координації.

### 3.3 Вибір параметрів ухилення судна за допомогою області неприпустимих значень параметрів руху судна

Процедура формування області неприпустимих значень параметрів руху судна запропонована і детально розглянута в роботі [117], тут же розглянемо її основні результати.

Раніше встановили, що зближення судна з цілю, за якого дистанція найкоротшого зближення  $\min D$  менше гранично - допустимої дистанції  $d_d$ , є небезпечним. Оскільки значення  $\min D$  залежить від пеленга на ціль  $\alpha$  і дистанції  $D$  між судном і цілю, а також від параметрів руху судна (курсу  $K_1$ , швидкості  $V_1$ ) і цілі  $K_2$ ,  $V_2$  [130], то за заданих значеннях  $\alpha$ ,  $D$ ,  $K_2$  і  $V_2$  існує множина поєднань параметрів руху судна  $K_1$  і  $V_1$ , коли має місце нерівність  $\min D \leq d_d$ . Якщо поєднання  $K_1$  і  $V_1$  розглядати, як точки  $(K_1, V_1)$  координатної площини  $K_1 \times V_1$ , то область  $\Omega_d$ , для кожної точки  $(K_1, V_1)$  якої виконується нерівність  $\min D \leq d_d$ , називається областю неприпустимих параметрів руху судна  $\Omega_d$ .

Беззаперечно, границями області неприпустимих значень  $\Omega_d$  є сукупність крапок курсу та швидкості кожного з суден  $(K_1, V_1)$ . Для кожної такої крапки  $(K_1, V_1)$  повинна досягатися рівність дистанції найкоротшого зближення та гранично - допустимої дистанції ( $\min D = d_d$ ). Враховуючи, що рівність дистанції найкоротшого зближення та гранично - допустимої дистанції досягається за відносного ухилення судна як управо, так і вліво відносно напрямку пеленга. Тому, очевидно, що утворюються дві межі, які обмежують область неприпустимих параметрів руху судна  $\Omega_d$ . В цьому випадку якщо точка  $(K_{1i}, V_{1i})$  належить області неприпустимих параметрів руху судна, то

зближення судна з цілю є небезпечним, оскільки дистанція найкоротшого зближення є меншою за гранично - допустиму дистанцію  $\min D < d_d$ . Інакше під час зближення небезпека зіткнення не виникає. Знайдемо аналітичний вираз для меж області  $\Omega_d$ . Для цього в рівність  $\min D = d_d$  слід підставити вираз для [130]:

$$\Delta D \sin(\alpha - K_{ot}) = d_d, \quad (3.16)$$

де  $K_{ot}$  - відносний курс;  $\Delta$  - відносне ухилення, знак якого забезпечує позитивне значення  $\min D$ , зважаючи на те, що  $\Delta = -1$ , коли  $\sin(\alpha - K_{ot}) < 0$ , інакше  $\Delta = 1$ .

Відмітимо, що рівність (3.16) може бути вірною для всіх курсів  $K_1$  судна тільки у випадку коли швидкість судна більша за швидкість цілі  $V_1 > V_2$ , зміни курсу, при чому відносний курс  $K_{ot}$  може приймати будь-яких значень.

Очевидно:

$$\alpha - K_{ot} = \arcsin \frac{d_d}{\Delta D}, \quad K_{ot} = \alpha - \arcsin \frac{d_d}{\Delta D}.$$

Введемо позначення  $\gamma = \alpha - \arcsin \frac{d_d}{\Delta D}$ . Залежно від знаку  $\Delta$  одержимо:

$$\gamma^{(1)} = \alpha - \arcsin \frac{d_d}{\Delta D}, \quad \text{коли } \Delta > 0,$$

$$\gamma^{(2)} = \alpha + \arcsin \frac{d_d}{\Delta D}, \quad \text{коли } \Delta < 0.$$

Очевидно,  $K_{ot} = \gamma^{(1,2)}$ , або  $\operatorname{tg} K_{ot} = \operatorname{tg} \gamma^{(1,2)}$ . Враховуємо:

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2} = \frac{\sin \gamma^{(1,2)}}{\cos \gamma^{(1,2)}}, \quad \text{тому}$$

$$(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \cos \gamma^{(1,2)} = (V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2) \sin \gamma^{(1,2)}, \text{ або}$$

$$V_1 (\sin K_1 \cos \gamma^{(1,2)} - \cos K_1 \sin \gamma^{(1,2)}) = V_2 (\sin K_2 \cos \gamma^{(1,2)} - \cos K_2 \sin \gamma^{(1,2)}),$$

звідки:

$$V_1 \sin(K_1 - \gamma^{(1,2)}) = V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)}),$$

$$\sin(K_1 - \gamma^{(1,2)}) = \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})}{V_1}$$

$$K_{11} - \gamma^{(1,2)} = \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})}{V_1},$$

$$K_{12} - \gamma^{(1,2)} = \pi - \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})}{V_1}.$$

Тому:

$$K_{11}^{(1)} = \gamma^{(1)} + \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})}{V_1},$$

$$K_{11}^{(2)} = \gamma^{(2)} + \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})}{V_1},$$

$$K_{12}^{(1)} = \gamma^{(1)} + \pi - \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})}{V_1},$$

$$K_{12}^{(2)} = \gamma^{(2)} + \pi - \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})}{V_1},$$

зважаючи на те, що необхідно враховувати обмеження на значення швидкості судна  $V_1$ . Річ у тому, що аргумент  $V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})/V_1$  під функцією  $\arcsin$  не може перевершувати 1, отже, мінімальне значення швидкості судна



в рівняннях меж  $K_{11}^{(2)}$  і  $K_{12}^{(2)}$  визначається величиною  $V_{1\min} = V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})$ , а для меж  $K_{11}^{(1)}$  і  $K_{12}^{(1)}$  -  $V_{1\min} = V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})$  до  $V_{1\max}$ , тому:

$$K_{11}^{(1)} \in [\gamma^{(1)} + \frac{\pi}{2}, \gamma^{(1)} + \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})}{V_{1\max}}],$$

$$K_{12}^{(1)} \in [\gamma^{(1)} + \frac{\pi}{2}, \gamma^{(1)} + \pi - \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})}{V_{1\max}}].$$

У свою чергу, для курсів  $K_{11}^{(2)}$  і  $K_{12}^{(2)}$  швидкість судна  $V_1 \in [V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)}), V_{1\max}]$  і

$$K_{11}^{(2)} \in [\gamma^{(2)} + \frac{\pi}{2}, \gamma^{(2)} + \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})}{V_{1\max}}],$$

$$K_{12}^{(2)} \in [\gamma^{(2)} + \frac{\pi}{2}, \gamma^{(2)} + \pi - \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})}{V_{1\max}}].$$

Отже, область неприпустимих параметрів судна, як функція курсу від швидкості, аналітично виражається для зближення на зустрічних курсах:

$$K_{11}^{(1)} = \gamma^{(1)} + \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})}{V_1},$$

$$K_{11}^{(2)} = \gamma^{(2)} + \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})}{V_1}, \quad (3.17)$$

з урахуванням раніше вказаних обмежень на швидкість  $V_1$ .

Аналогічно, для попутних курсів:

$$K_{12}^{(1)} = \gamma^{(1)} + \pi - \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})}{V_1},$$

$$K_{12}^{(2)} = \gamma^{(2)} + \pi - \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})}{V_1}. \quad (3.18)$$

Для ситуації зближення з параметрами:  $\alpha = 128^\circ$ ,  $D = 3,5$  милі,  $K_1 = 100^\circ$ ,  $V_1 = 22$  вузла,  $K_2 = 350^\circ$ ,  $V_2 = 17$  вузлів,  $d_d = 1$  миля, за допомогою комп'ютера були розраховані межі області  $\Omega_d$ .

Зважаючи на те, що розрахунок меж проводився за допомогою рівнянь (3.17) а область неприпустимих параметрів руху судна  $\Omega_d$  показана на рисунку 3.8.

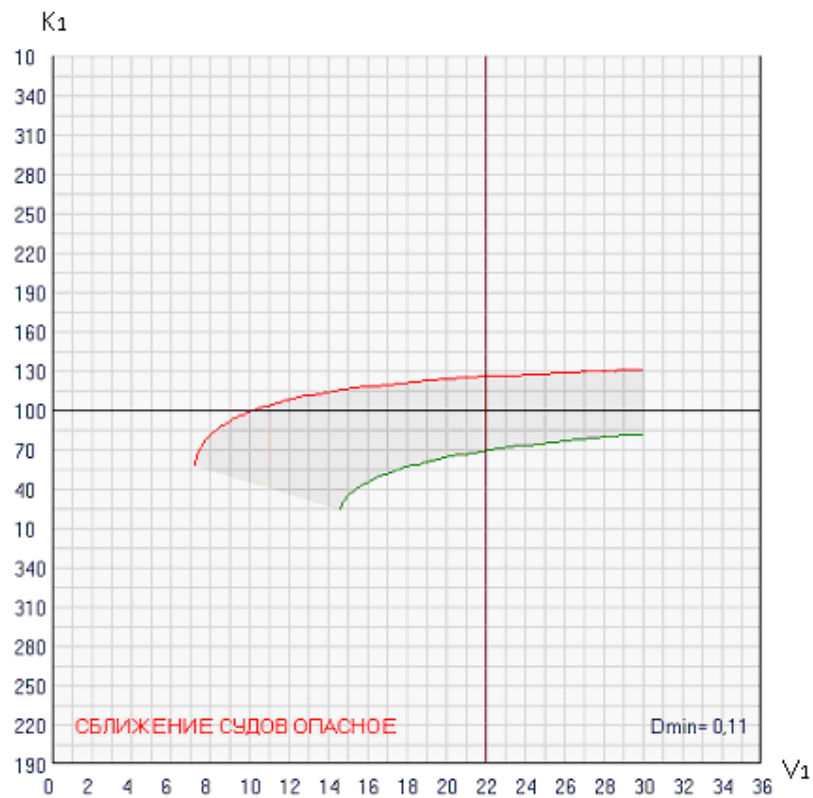


Рисунок 3.8 – Область неприпустимих параметрів руху судна  $\Omega_d$

Як вказується в роботі [9], залежно від співвідношення швидкостей судна  $V_1$  і цілі  $V_2$  під час зміни курсу судна  $K_1$  виникає особливість зміни від-

носного курсу  $K_{ot}$ . У випадку  $V_1 > V_2$  величина першої похідної  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}$  позитивна для всіх значень, тому відносний курс  $K_{ot}$  може приймати будь-які значення від 0 до  $2\pi$ .

Якщо ж  $V_1 < V_2$  відображення множини відносних курсів в множину істинних курсів судна не є однозначним, оскільки перша похідна  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}$  може мати як позитивний, так і від'ємний знаки, тобто кожному відносному курсу, окрім екстремальних, відповідає два значення істинного курсу судна, а під час зміни курсу  $K_1$  судна в діапазоні від 0 до  $2\pi$  відносний курс  $K_{ot}$  прийматиме значення з діапазону  $[K_{otmin}, K_{otmax}]$ , зважаючи на те, що :

$$K_{otmin} = \pi + K_2 - \arcsin \frac{V_1}{V_2} \quad \text{і} \quad K_{otmax} = \pi + K_2 + \arcsin \frac{V_1}{V_2}.$$

З виразу очевидно, що вибір маневру розходження зміною курсу за небезпечного зближення судна з цілю за допомогою області неприпустимих значень параметрів руху, як вище указувалося, можливий за лишу під час ситуації, коли швидкість судна більша за швидкість цілі  $V_1 > V_2$ . У випадку ж  $V_1 < V_2$  використання області неприпустимих значень параметрів руху  $\Omega_d$  для використання судном для безпечного маневру ухилення від небезпечної цілі не є коректним, адже не всі відносні курси можуть бути досягнуті зміною курсу судна. Тому коли швидкість судна менше за швидкість цілі  $V_1 < V_2$  доречно обирати безпечний відносний курс ухилення в системі змінних координат з відносного курсу  $K_{ot}$  і швидкості судна  $V_1$ .

Підмножина відносних курсів, за яких зближення судна і цілі небезпечне, обмежена значеннями  $K_{ot*} = \gamma^{(1)} = \alpha - \arcsin \frac{d_d}{D}$  і

$K_{ot}^* = \gamma^{(2)} = \alpha + \arcsin \frac{d_d}{D}$ , тобто  $Mn1_{ot} = [\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}]$ . У свою чергу, підмножина всіх можливих відносних курсів ухилення коли  $V_1 < V_2$  визначається підмножиною  $Mn2_{ot} = [K_{otmin}, K_{otmax}]$ . Якщо є підмножина відносних курсів  $Mn3_{ot}$ , яка одночасно задовольняє умовам  $Mn3_{ot} \in Mn2_{ot}$  і  $Mn3_{ot} \notin Mn1_{ot}$ , то як відносний курс ухилення  $K_{oty}$  може бути вибраний будь-який відносний курс підмножини  $Mn3_{ot}$ , тобто  $K_{oty} \in Mn3_{ot}$ . По вибраному  $K_{oty}$  можна знайти відповідний істинний курс судна  $K_{1y}$  [130].

Як приклад для випадку  $V_1 < V_2$  розглянута ситуація зближення з наступними параметрами:  $\alpha = 106^\circ$ ,  $D = 3,0$  милі,  $K_1 = 45^\circ$ ,  $V_1 = 15$  вузла,  $K_2 = 317^\circ$ ,  $V_2 = 20$  вузлів,  $d_d = 1$  миля. Для даної ситуації графічне відображення підмножин відносних курсів  $Mn1_{ot}$  і  $Mn2_{ot}$  показано на рисунку 3.9.

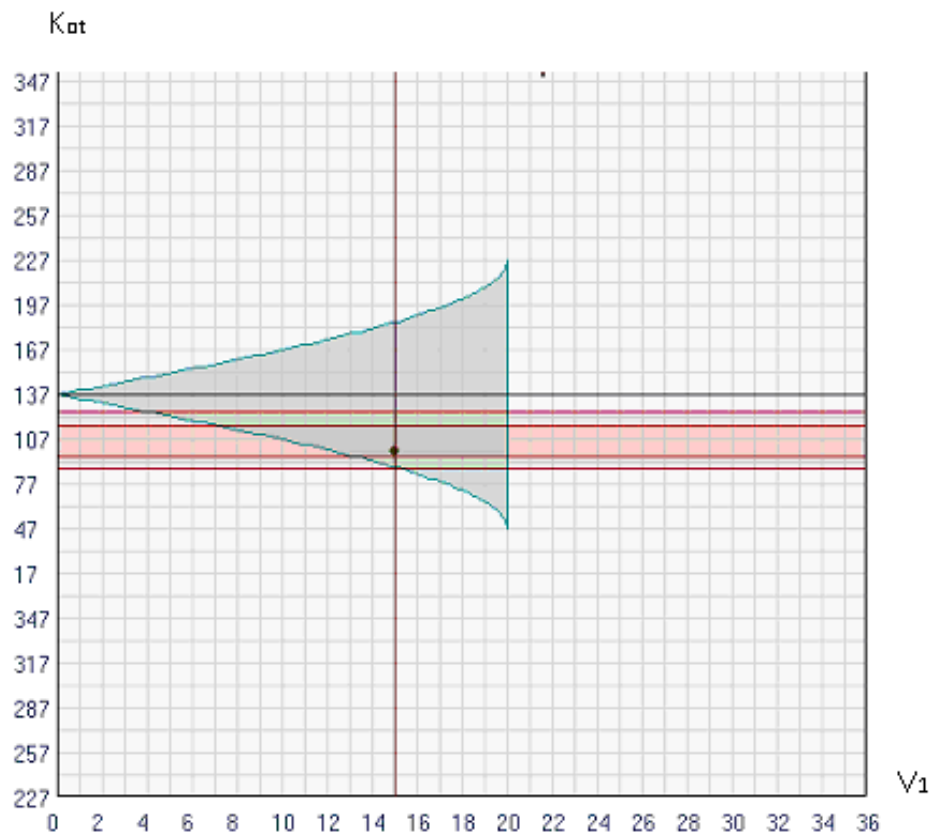


Рисунок 3.9 – Підмножини відносних курсів  $Mn1_{ot}$  і  $Mn2_{ot}$

Коли швидкість основного судна є більшою за швидкість цілі  $V_1 > V_2$ , за використання області неприпустимих параметрів руху судна  $\Omega_d$  є можливість оцінки зближення судна з цілю на предмет безпечності. Для цього достатньо перевірити приналежність точки з параметрами руху судна  $(K_1, V_1)$  області  $\Omega_d$ . Якщо точка належить області неприпустимих значень параметрів руху  $(K_1, V_1) \in \Omega_d$ , то таке зближення є небезпечним. В іншому випадку – навпаки судно і ціль зближуються безпечно. У разі небезпечного зближення за допомогою області неприпустимих значень параметрів руху  $\Omega_d$  можна підібрати та вибрати маневр розходження суден шляхом зміни курсу судна за незмінної швидкості. Такому маневру розходження відповідає точка  $(K_{1y}, V_1)$ , що знаходиться на межі області неприпустимих значень параметрів руху  $\Omega_d$ .

Так для першого даного прикладу, область  $\Omega_d$  для якого приведена на рисунку 3.8, точка з початковими параметрами руху судна ( $K_1=100^\circ$ ,  $V_1=22$  вузла), що знаходиться на перетині відповідних горизонтальної і вертикальної ліній, належить області, зважаючи на те, що дистанція найкоротшого зближення  $\min D = 0,11$  милі істотно менше за значення  $d_d$ .

В такому випадку є необхідність визначення курсу ухилення  $K_{1y}$  судна в ситуації зближення суден, коли дистанція найкоротшого зближення  $\min D$  досягає значення гранично - допустимої дистанції  $d_d$ , тому виникає потреба у використанні області неприпустимих параметрів руху  $\Omega_d$ . Комп'ютерний алгоритм розробленої програми дозволяє інтерактивне ведення курсу ухилення  $K_{1y}$  судна. Це дозволяє змінити положення горизонтальної лінії, яка залежить від значення курсу ухилення базового судна  $K_{1y}$ . Зміна курсу ухилення  $K_{1y}$  проодиться до тих пір, поки горизонтальна лінія не досягне межі області неприпустимих значень параметрів руху (рис. 3.10).

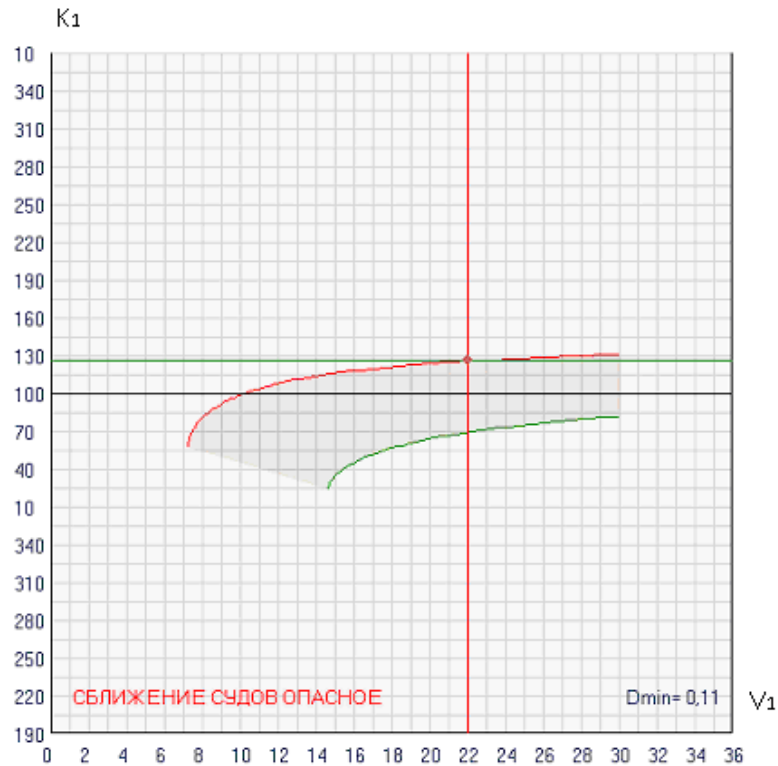


Рисунок 3.10 – Вибір курсу ухилення судна  $K_{1y}$  коли  $V_1 > V_2$

У зазначеному прикладі межа області неприпустимих значень параметрів руху  $\Omega_d$  досягається коли  $K_{1y}=126^\circ$ , при цьому дистанція найкоротшого зближення дорівнює 1 милі ( $\min D=1$  миля). Отже, ввівши початкові параметри ситуації зближення в описувану комп'ютерну програму, одержуємо графічне зображення області  $\Omega_d$  і положення точки  $(K_1, V_1)$  початкових параметрів руху судна. Візуально оцінюємо приналежність точки області  $\Omega_d$  і робимо висновок про наявність небезпеки зближення і необхідності вибору курсу ухилення судна. У разі потреби переміщенням повзунка лінійки прокрутки суміщаємо горизонтальну лінію з вибраною межею області  $\Omega_d$ , одержуючи курс ухилення судна.

Розглянемо інший випадок, а саме, ситуацію, коли швидкість базового судна менше за швидкості цілі, тобто  $V_1 < V_2$ . З рисунку 3.9 видно, дистанції найкоротшого зближення та гранично - допустимої дистанції належить підмножині  $Mn1_{ot}$ . Така ситуація можлива, коли точка з початковим відносним

курсом  $K_{oto} = 99^\circ$ , який відповідає  $K_1 = 45^\circ$ , і швидкістю судна  $V_1$ , бо межі підмножини  $Mn1_{ot}$  не залежать від швидкості судна, зважаючи на те, що нижня межа  $K_{ot*} = 87^\circ$  і верхня -  $K_{ot}^* = 125^\circ$ . Коли швидкість судна  $V_1 = 15$  вузлів межі підмножини  $Mn2_{ot}$  визначаються значеннями  $K_{otmin} = 88^\circ$  і  $K_{otmax} = 186^\circ$ . В ситуації, коли  $K_{ot*} < K_{otmin}$  ухиленням судна вліво неможливо збільшити дистанцію найкоротшого зближення  $\min D$  до значення гранично-допустимої дистанції  $d_d$ . Тому введенням значення курсу ухилення судна  $K_{1y}$  поворотом управо за допомогою лінійки прокрутки змінюємо величину відносного курсу  $K_{oty}$  і положення горизонтальної лінії, відповідної йому, до тих пір, поки не сумістимо її з верхньою межею  $K_{ot}^*$  підмножини  $Mn1_{ot}$ , як показано на рисунку 3.11. З рисунку видно, що  $K_{oty} = K_{ot}^* = 125^\circ$ . Значення курсу ухилення судна, що при цьому виводиться, склало  $K_{1y} = 109^\circ$ , а значення  $\min D = 0,99$  милі.

Отже, у випадку  $V_1 < V_2$  процедура оцінки небезпеки зближення судна з цілю і вибору курсу ухилення судна, реалізована в комп'ютерній програмі, дозволяє оперативно візуально оцінити небезпеку ситуації зближення і у разі потреби за допомогою лінійки прокрутки елементарно визначити курс ухилення, за якого  $\min D = d_d$ .

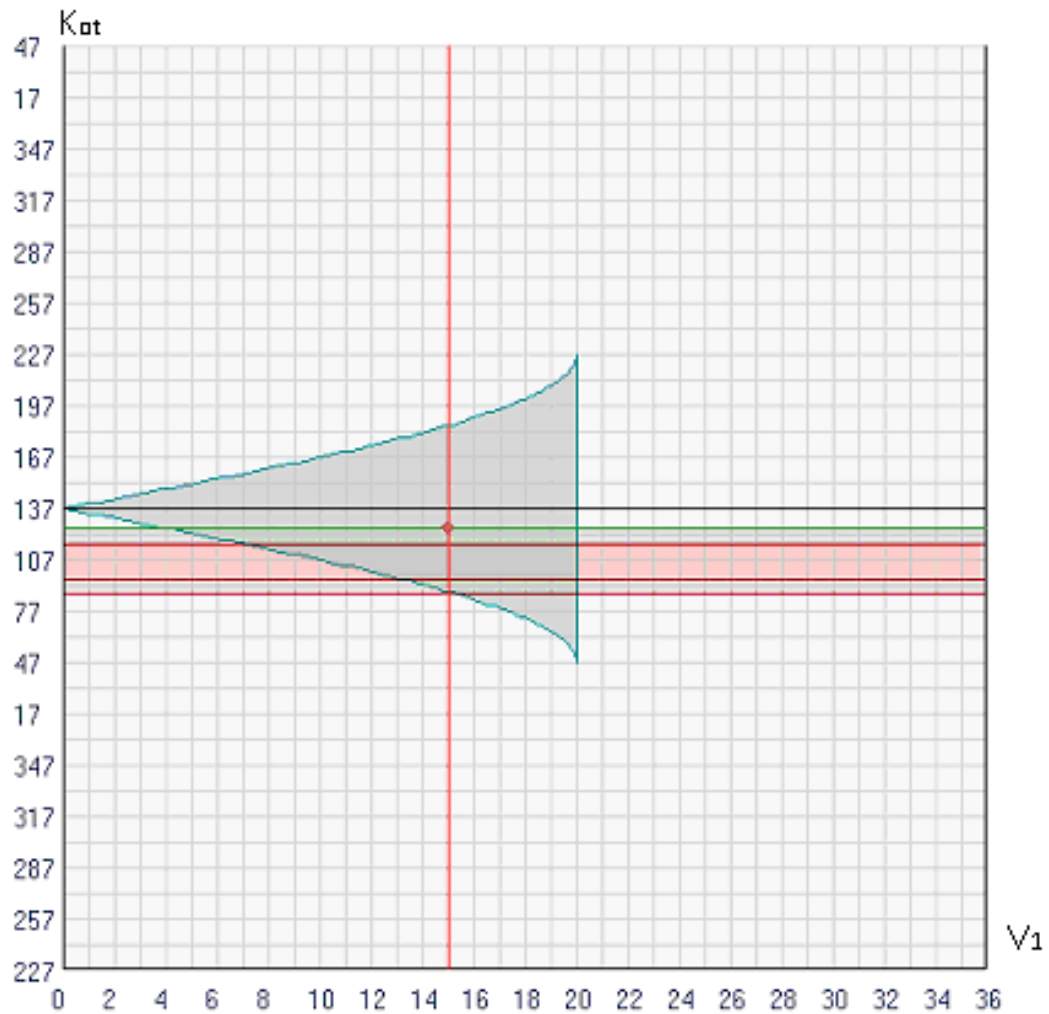


Рисунок 3.11 – Вибір курсу ухилення судна  $K_{1y}$  коли  $V_1 < V_2$

Отже, запропонована процедура оцінки небезпеки зближення судна з цілю і вибір маневру розходження ухиленням за допомогою області  $\Omega_d$  у випадку  $V_1 > V_2$ , як і процедура визначення курсу ухилення судна  $K_{1y}$  коли  $V_1 < V_2$ , реалізовані на комп'ютері у вигляді програми, забезпечили оперативність і простоту рішення поставленої задачі.

#### 3.4 Спосіб вибору маневру розходження за допомогою електронної карти

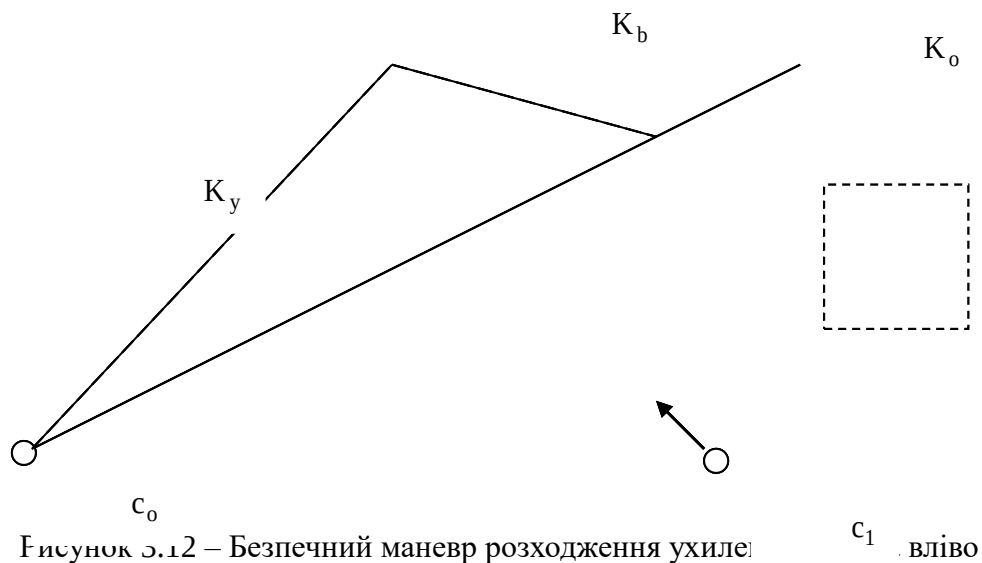
Під час плавання судна в обмежених водах в ситуації небезпечного зближення судна з цілю вибір маневру розходження проводиться з урахуванням навігаційних перешкод і суден, що заважають. Тому під час вибору ма-



невру розходження крім обмежень по безпеці розходження необхідно враховувати обмеження по навігаційних перешкодах.

Існуючий підхід аналітичного урахування навігаційних перешкод під час вибору безпечної стратегії розходження, запропонований в роботах [1,42], вимагає модернізації ЗАРП і коректність розрахованої стратегії розходження не може бути оперативно оцінена судноводієм. Проте використання ЕКНІС дозволяє відображати на електронній карті положення і рух цілей в просторі істинного руху. Враховуючи, що на електронній карті нанесені навігаційні небезпеки, оперативне відображення небезпечних областей навколишніх цілей дозволяє вибирати безпечні траєкторії руху судна і, отже, формувати безпечну стратегію розходження, виходячи з аналізу навігаційної інформації електронної карти.

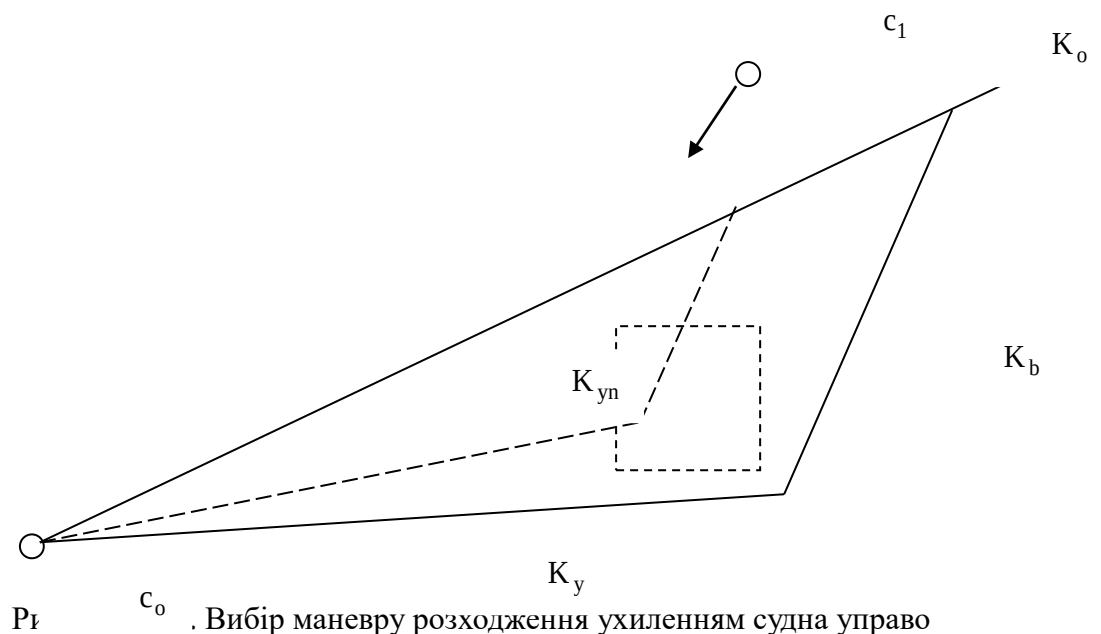
Розглянемо в першому наближенні спосіб використання електронної карти для вибору безпечного маневру розходження судна з цілю за наявності навігаційних небезпек. Для цього звернемося до рисунку 3.12, на якому показані положення судна  $c_0$ , цілі  $c_1$  і навігаційна перешкода ND.



Припустимо за допомогою області неприпустимих значень параметрів руху судна  $\Omega_d$  виробляється оцінка небезпеки зближення з цілю  $c_1$ , яка пока-

зує наявність ситуативного збурення і за допомогою тієї ж області  $\Omega_d$  проводиться визначення безпечного курсу ухилення  $K_y$  поворотом вліво, оскільки під час ухилення судна управо виникає загроза з боку навігаційної небезпеки ND. Траєкторія руху судна по ділянці ухилення відображається на електронній карті і свідчить про безпечний маневр розходження. Тому такий маневр розходження може бути реалізований судном для попередження зіткнення.

Проте, під час визначення курсу ухилення за допомогою області  $\Omega_d$  можлива ситуація, коли курс ухилення  $K_{yn}$  веде до навігаційної небезпеки (рис. 3.13).



У такій ситуації слід збільшувати значення курсу ухилення до величини  $K_y$ , за якого траєкторія ухилення, що відображається на електронній карті, проходить в стороні від навігаційної перешкоди. Очевидно, що в цьому випадку дистанція найкоротшого зближення судна з цілю  $\min D$  перевершує величину гранично - допустимої дистанції  $d_d$ ,  $\min D > d_d$  і маневр розходження не є оптимальним по критерію безпеки розходження, проте він є оптимальним по сумісному урахуванню обмежень по безпеці розходження і навігаційним перешкодам.

Описаний підхід доцільний в ситуаціях небезпечного зближення з декількома небезпечними цілями, коли застосовуються області неприпустимих значень параметрів  $\Omega_d$  по кожній цілі, і вибирається курс ухилення безпечний по відношенню до кожної цілі. Аналогічно враховуються судна, що заважають, і наявність декількох навігаційних перешкод.

### 3.5 Висновки за третім розділом

У третьому розділі приведені аналітичні вирази, що зв'язують параметри відносного і істинного руху пари суден. Показано, що значення істинного курсу базового судна за заданого відносного курсу і параметрах руху цілі залежить від співвідношення швидкостей судна і цілі.

Розглянуто стратегії розходження судна і їх характеристики в ситуації небезпечного зближення з цілю. Приведена оцінка рівня небезпеки зближення суден за допомогою ситуативного збурення. Показано, що стратегії розходження судна залежно від значення ситуативного збурення відносяться до стандартних стратегій або стратегій екстреного розходження. Стандартні стратегії містять дві ділянки і розрізняються ухиленням управо і ухиленням вліво. Структура стратегій екстреної розходження залежить від поведінки цілі в процесі зближення і на чолі приведені чотири типи стратегій екстреного розходження. Розглянуті в розділі стратегії описують весь процес розходження з моменту часу початку ухилення з програмної траєкторії розходження до моменту часу повернення на неї після розходження з цілю.

Оскільки для розходження необхідно встановити наявність ситуативного збурення і у разі потреби вибрати курс ухилення, то на чолі розглянута процедура формування області неприпустимих значень параметрів руху судна за різних співвідношень швидкостей судна і цілі. Показаний вибір оптимального значення курсу ухилення, коли дистанція найкоротшого зближення судна з цілю дорівнює величині гранично - допустимої дистанції.

Приведений короткий опис шляху рішення головної задачі дисертаційного дослідження вибору безпечного маневру розходження за допомогою електронної карти шляхом відображення на ній планованих ділянок траєкторії розходження.

## РОЗДІЛ 4. МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО ВИБОРУ МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН

### 4.1 Аналітичні вирази для розрахунку параметрів маневру розходження

Розглянемо розходження суден зміною курсу, коли маневр розходження проводиться з урахуванням інерційності судна. Припустимо, гранично - допустима дистанція найкоротшого зближення, на якій планується розходження суден, рівна  $D_d$ .

Спочатку розглянемо ситуацію розходження, коли задане значення курсу ухилення судна  $\tilde{K}_y$ , якому відповідає відносний курс  $\tilde{K}_{oty}$ , і вимагається знайти момент часу початку ухилення  $t_y^*$ , який забезпечить розходження з цілю на найкоротшій дистанції  $D_d$ .

Аналітичним виразом, що відображає безпечну розходження в заданій дистанції  $D_d$ , є рівність (рис. 4.1):

$$l(t_{yk}) \sin[\tilde{K}_{oty} - \alpha(t_{yk})] = D_d, \quad (4.1)$$

де ліва частина рівності є аналітичним виразом для дистанції найкоротшого зближення, зважаючи на те, що  $l(t_{yk})$  і  $\alpha(t_{yk})$  – відповідно дистанція і пеленг на ціль у момент часу закінчення повороту  $t_{yk}$  для розбіжності з цілю.

При цьому враховуємо, що  $t_{yk} = t_y^* + \tau$ , де  $\tau$  - тривалість повороту судна під час ухилення.

Очевидно, що останній вираз (4.1) можна записати в наступному вигляді:

$$l(t_{yk})[\sin\tilde{K}_{oty}\cos\alpha(t_{yk}) - \cos\tilde{K}_{oty}\sin\alpha(t_{yk})] = D_d \quad \text{або}$$

$$\Delta\eta(t_{yk})\sin\tilde{K}_{oty} - \Delta\xi(t_{yk})\cos\tilde{K}_{oty} = D_d, \quad (4.2)$$

де  $\Delta\eta(t_{yk})$  і  $\Delta\xi(t_{yk})$  – різниця координат цілі і судна у момент часу  $t_{yk}$ , зважаючи на те, що  $\Delta\eta(t_{yk}) = l(t_{yk})\cos\alpha(t_{yk})$  і  $\Delta\xi(t_{yk}) = l(t_{yk})\sin\alpha(t_{yk})$ .

З другого боку різниця координат  $\Delta\xi(t_{yk})$  і  $\Delta\eta(t_{yk})$  визначаються наступними виразами:

$$\Delta\eta(t_{yk}) = \Delta\eta_n - V_{otn} t_y^* \cos K_{otn} - \Delta\tilde{\eta}, \quad \Delta\xi(t_{yk}) = \Delta\xi_n - V_{otn} t_y^* \sin K_{otn} - \Delta\tilde{\xi},$$

де  $V_{otn}$  і  $K_{otn}$  - початкові відносні швидкість і курс;

$\Delta\eta_0$ ,  $\Delta\xi_0$ ,  $\Delta\eta_1$ ,  $\Delta\xi_1$  - відповідно прирости координат судна і цілі за інтервал часу  $\tau$ .

З урахуванням приведених позначень вираз (4.2) можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} & (\Delta\eta_n - V_{otn} t_y^* \cos K_{otn} - \Delta\eta_0 + \Delta\eta_1) \sin\tilde{K}_{oty} - \\ & \rightarrow (\Delta\xi_n - V_{otn} t_y^* \sin K_{otn} - \Delta\xi_0 + \Delta\xi_1) \cos\tilde{K}_{oty} = D_d, \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} & t_y^* V_{otn} (\sin K_{otn} \cos\tilde{K}_{oty} - \cos K_{otn} \sin\tilde{K}_{oty}) = D_d - (\Delta\eta_n - \Delta\eta_0 + \Delta\eta_1) \sin\tilde{K}_{oty} \rightarrow \\ & \rightarrow + (\Delta\xi_n - \Delta\xi_0 + \Delta\xi_1) \cos\tilde{K}_{oty}, \end{aligned}$$

звідки нескладно знайти вираз для  $t_y^*$ , враховуючи, що  $\Delta\xi_n = l_n \sin\alpha_n$  і

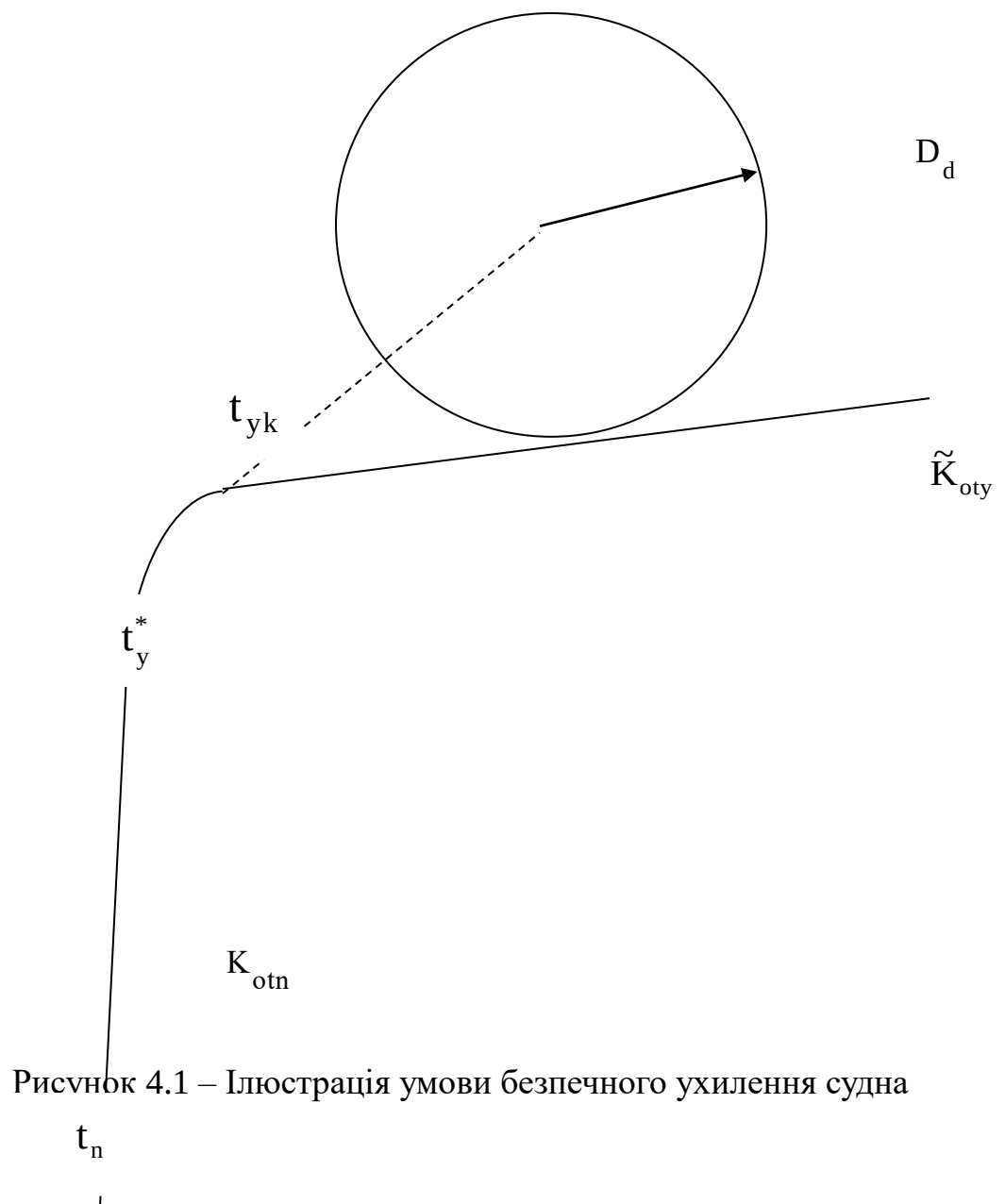
$$\Delta\eta_n = l_n \cos\alpha_n, \text{ а також } \Delta\xi_1 = V_1 \tau \sin K_1 \text{ і } \Delta\eta_1 = V_1 \tau \cos K_1:$$

$$t_y^* = \hat{t}_y^* - [\Delta \xi_0 \cos \tilde{K}_{oty} - \Delta \eta_0 \sin \tilde{K}_{oty} + V_c \tau \sin(\tilde{K}_{oty} - K_c)] / V_{otn} \sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty}),$$

де  $V_c, K_c$  - швидкість і курс цілі;

$\hat{t}_y^*$  - момент часу початку маневру, розрахований без урахування динаміки судна, яке визначається виразом:

$$\hat{t}_y^* = [D_d + 1_n \sin(\alpha_n - \tilde{K}_{oty})] / V_{otn} \sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty}).$$



Рисунк 4.1 – Ілюстрація умови безпечного ухилення судна

Значення величин  $\Delta\eta_o$ ,  $\Delta\xi_o$  і  $\tau$  у виразі для  $t_y^*$  визначаються динамічною моделлю, що описує рух судна.

Припустимо, що поворот судна містить дві фази кладки керма. Спочатку, на першій фазі, в початковий момент часу проводиться перекладання керма на кут  $\beta_k$  і кермо утримується в такому положенні протягом інтервалу часу  $\Delta t_k$ . Потім проводиться перекладання керма на протилежний борт на ту ж величину і гаситься інерція повороту судна протягом інтервалу часу  $\Delta t$ , по закінченню якого судно виходить на заданий курс, кутова швидкість повороту обертається в нуль, а кермо приводиться в діаметральну площину судна.

Отже, для розрахунку величини  $t_y^*$  необхідно обчислити інтервали часу  $\Delta t_k$  і  $\Delta t$ , які в сумі дають величину часу повороту судна  $\tau$ , а також приріст координат судна за цей час  $\Delta\eta_o$ ,  $\Delta\xi_o$ .

Очевидно, що поточне значення курсу судна на першій і другій фазах повороту має різний аналітичний вираз, тому поточне значення курсу судна на першій фазі повороту позначимо через  $K$ , а на другій – через  $\tilde{K}$ .

Якщо врахувати, що в результаті повороту сумарна зміна курсу судна задана  $\Delta K = K_y - K_o$  (оскільки заданий курс ухилення  $K_y$ ) і повинна бути реалізована на обох фазах, то можна записати перше рівняння для обчислення інтервалів часу  $\Delta t_k$  і  $\Delta t$ , що має вигляд:

$$\Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t).$$

Другим рівнянням для обчислення  $\Delta t_k$  і  $\Delta t$  є умова перетворення в нуль до кінця повороту кутової швидкості судна, тобто  $\omega(\Delta t_k, \Delta t) = 0$ . Вирішуючи систему одержаних рівнянь, знаходимо величини  $\Delta t_k$  і  $\Delta t$ , які дозволяють обчислити прирости координат судна  $\Delta\eta_o$ ,  $\Delta\xi_o$ .



Отже, враховуючи певну динамічну модель руху судна, одержуємо для неї в явному вигляді систему рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t) \\ \omega(\Delta t_k, \Delta t) = 0 \end{cases},$$

вирішуючи яку знаходимо величини  $\Delta t_k$ ,  $\Delta t$ ,  $\tau$ ,  $\Delta \eta_0$ ,  $\Delta \xi_0$  і  $t_y^*$ .

Отже, як робоча формула надалі застосовуємо:

$$\tilde{t}_y = \frac{\Delta_y D \sin(\tilde{K}_{oty} - \alpha) - D_d}{\Delta_y V_{otn} \sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty})}. \quad (4.1)$$

З урахуванням інерційності судна момент часу початку повороту ухилення  $t_y$  визначається виразом [9]:

$$t_y = \tilde{t}_y - \frac{\Delta_y (\Delta \xi_0 \cos \tilde{K}_{oty} - \Delta \eta_0 \sin \tilde{K}_{oty}) + V_c \tau_y \sin(\tilde{K}_{oty} - K_c)}{V_{otn} \sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty})},$$

де  $\tau_y$  – тривалість повороту ухилення судна;

$\Delta \xi_0$  і  $\Delta \eta_0$  – приріст координат базового судна за час повороту  $\tau_y$ ;

$K_c$  – курс цілі.

Значення тривалості повороту ухилення судна, а також збільшення координат базового судна  $\Delta \xi_0$  і  $\Delta \eta_0$  за час повороту визначаються динамічною моделлю обертального руху судна. У даній роботі скористаємося кінематичною моделлю обертального руху судна з постійною кутовою швидкістю  $a_\omega$ . В цьому випадку, як показано в роботі [9]:

$$\tau_y = \left| \frac{K_y - K_o}{a_\omega} \right|,$$

$$\Delta\xi_o(\tau_y) = \frac{V_o}{a_\omega}(\cos K_o - \cos K_y), \quad \Delta\eta_o(\tau_y) = \frac{V_o}{a_\omega}(\sin K_y - \sin K_o).$$

Після розходження вихід судна на програмну траєкторію відбувається під кутом  $\gamma$  до напрямку програмної траєкторії, зважаючи на те, що кут  $\gamma$  має сенс вибрати в межах від  $30^\circ$  до  $90^\circ$ . Момент часу  $t_{b*}$  повороту судна з курсу ухилення на курс виходу визначається виразом [9]:

$$t_{b*} = t_y + \frac{\Delta_b D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otb} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(\tilde{K}_{oty} - K_{otb})},$$

де  $\Delta_b = \text{sign}[\sin(K_{otb} - K_{oty})]$ ;

$V_{oty}$  – відносна швидкість на ділянці виходу.

З урахуванням інерційності судна з одержаного виразу слід відняти поправку за інерційність  $\Delta t_b$ :

$$t_b = t_{b*} - \Delta t_b,$$

де  $\Delta t_b$  виражається Отже:

$$\Delta t_b = \frac{\Delta_b (\Delta\eta_o \sin K_{otb} - \Delta\xi_o \cos K_{otb}) + V_c \tau_b \sin(\tilde{K}_{otb} - K_c)}{V_{oty} \sin(\tilde{K}_{oty} - K_{otb})}.$$

Тривалість повороту  $\tau_b$  і збільшення координат розраховуються Отже:

$$\tau_b = \left| \frac{K_b - K_y}{a_\omega} \right|,$$

$$\Delta\xi_o(\tau_b) = \frac{V_o}{a_\omega}(\cos K_y - \cos K_b), \quad \Delta\eta_o(\tau_b) = \frac{V_o}{a_\omega}(\sin K_b - \sin K_y).$$

На закінчення приведемо вираз для розрахунку моментів часу повороту на програмну траєкторію руху судна [9]:

$$t_{kn} = t_b + \frac{L_p}{V_o |\sin(K_b - K_k)|} - \Delta t_k,$$

$$\text{де } L_p = \delta_y V_o (t_b - t_y) \sin(K_y - K_o);$$

$$\Delta t_k = \frac{l_2}{V_o |\sin(K_b - K_k)|},$$

$$l_2 = \delta_y [\Delta\xi_o^2(\tau_k) + \Delta\eta_o^2(\tau_k)]^{1/2} \sin \varepsilon,$$

$$\varepsilon = \arctg[\Delta\eta_o(\tau_k)/\Delta\xi_o(\tau_k)] - K_k,$$

$\tau_k$  – тривалість повороту судна.

Тривалість повороту  $\tau_k$  і приріст координат розраховуються за допомогою формул:

$$\tau_k = \left| \frac{K_k - K_b}{a_\omega} \right|,$$

$$\Delta\xi_o(\tau_k) = \frac{V_o}{a_\omega}(\cos K_b - \cos K_k), \quad \Delta\eta_o(\tau_k) = \frac{V_o}{a_\omega}(\sin K_k - \sin K_b).$$

У разі, коли швидкість судна менше швидкості цілі, тобто  $V_o < V_c$ , відносна траєкторія розходження може приймати чотири форми, як показано в роботі [131], які характеризуються двома параметрами  $\Delta_y$  і  $\Delta_b$ , перший з яких указує на сторону зміни відносного курсу на ділянці ухилення у момент часу  $t_y$ , а другий – на ділянці повороту до програмної траєкторії у момент часу  $t_b$ . Кожний з параметрів може приймати значення 1 або -1, зважаючи на

те, що відповідність значень  $\Delta_y$  і  $\Delta_b$  чотирьом формам приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення параметрів  $\Delta_y$  і  $\Delta_b$

| Формі      | 1  | 2  | 3 | 4  |
|------------|----|----|---|----|
| $\Delta_y$ | 1  | -1 | 1 | -1 |
| $\Delta_b$ | -1 | 1  | 1 | -1 |

Для всіх чотирьох форм відносної траєкторії  $t_y$  час початку повороту ухилення розраховується по формулі:

$$t_y = \tilde{t}_y - \frac{\Delta_y (\Delta \xi_o \cos \tilde{K}_{oty} - \Delta \eta_o \sin \tilde{K}_{oty}) + V_c \tau_y \sin(\tilde{K}_{oty} - K_c)}{V_{otn} \sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty})}.$$

У останньому виразі

$$\tilde{t}_y = \frac{|D \sin(\tilde{K}_{oty} - \alpha)| - D_d}{V_{otn} |\sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty})|}.$$

Для першої і другої форм відносної траєкторії розходження момент часу початку виходу:

$$t_b = t_y + \frac{D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otb} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(\tilde{K}_{oty} - K_{otb})} - \Delta t_b,$$

$$\text{де } \Delta t_b = \frac{\delta_y \Delta_b (\Delta \eta_o \sin K_{otb} - \Delta \xi_o \cos K_{otb}) + V_c \tau_b \sin(\tilde{K}_{otb} - K_c)}{V_{oty} \sin(\tilde{K}_{oty} - K_{otb})}.$$

Якщо реалізуються третя і четверта форми відносної траєкторії розходження, то розрахунок величини  $t_{b*}$  через те що  $\Delta_y \Delta_b = 1$ , проводиться іншим способом. Для отримання необхідного аналітичного виразу звертаємося до рисунку 4.2.

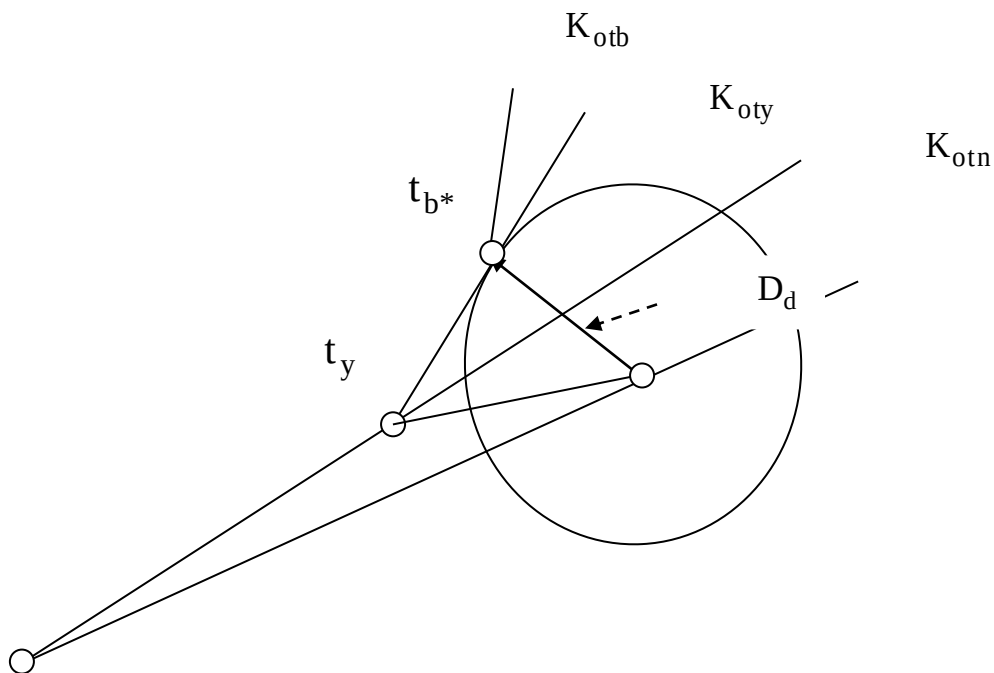


Рисунок 4.2 – Визначення часу виходу  $t_{b*}$

З рисунку:

$$t_{b*} = t_y + \frac{D_y \cos(K_{oty} - \alpha_y)}{V_{oty}},$$

де  $\alpha_y$  і  $D_y$  - відповідно пеленг і дистанція до цілі у момент часу  $t_y$ .

Момент часу повороту до програмної траєкторії з урахуванням інерційності судна:

$$t_b = t_{b*} - \Delta t_b,$$

зважаючи

на

те,

що

$$\Delta t_b = \frac{-\delta_y \Delta_b (\Delta \eta_o \sin K_{otb} - \Delta \xi_o \cos K_{otb}) cm + V_c \tau_b \sin(K_{otb} - K_c)}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})}.$$

Незалежно від форми відносної траєкторії розходження час початку повороту на програмну траєкторію розраховується Отже [132]:

$$t_{kn} = t_b + \frac{L_p}{V_o |\sin(K_b - K_k)|} - \Delta t_k,$$

$$\text{де } L_p = |V_o (t_b - t_y) \sin(K_y - K_o)|,$$

$$\Delta t_k = cmk \frac{l_2}{V_o |\sin(K_b - K_k)|},$$

$cmk = \pm 1$ , а знак визначається співвідношенням знаків  $\delta_y$ ,  $\Delta_y$  і  $\Delta_b$ ,

$$l_2 = \Delta_b [\Delta \xi_o^2(\tau_k) + \Delta \eta_o^2(\tau_k)]^{1/2} \sin \varepsilon,$$

$$\varepsilon = \arctg[\Delta \eta_o(\tau_k) / \Delta \xi_o(\tau_k)] - K_k,$$

$\tau_k$  – тривалість повороту судна.

#### 4.2 Розробка процедур інформаційної системи, необхідних для оцінки ситуації зближення і оптимізації маневру розходження

Розглянемо параметри ухилення маневру розходження, до яких відносяться момент часу початку ухилення  $t_y$  і курс ухилення  $K_y$ . У разі небезпечного зближення, як показано в попередньому підрозділі, безпечне ухилення судна від небезпечної цілі на дистанцію найкоротшого зближення рівну гранично - допустимій дистанції зближення можливо на початку ухилення у момент часу  $t_y$  курсом ухилення  $K_y$ , які зв'язані виразом (4.1). Даний вираз

можна трактувати як криву на площині, заздалегідь перетворивши відносний курс ухилення  $K_{oty}$  в істинний курс  $K_y$ .

Проте, враховуючи можливе ухилення судна, як управо, так і вліво, доцільно знайти залежність курсу ухилення  $K_y$  від моменту часу початку ухилення  $t_y$ . Для цього розглянемо рисунок 4.3, з якого нескладно знайти залежність відносного курсу  $K_{oty}$  від моменту часу  $t_y$ , а потім з набутого значення  $K_{oty}$  по відомій залежності визначити величину  $K_y$ .

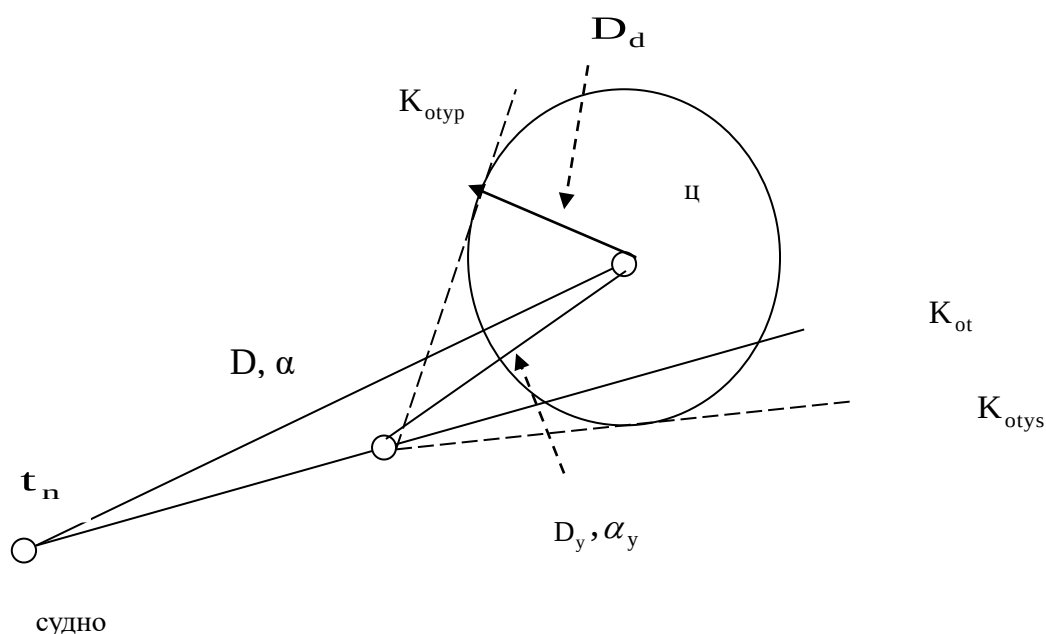


Рисунок 4.3 – Визначення відносного курсу ухилення

Як випливає з наведеного рисунку, для довільного моменту часу початку ухилення судна  $t_y$  відносні курси ухилення управо  $K_{otys}$  і вліво  $K_{otyp}$  визначаються виразами:

$$K_{otys} = \alpha_y + \frac{D_d}{D_y},$$

$$K_{otyp} = \alpha_y - \frac{D_d}{D_y}. \quad (4.2)$$

Вирази для розрахунку значень дистанції  $D_y$  і пеленга  $\alpha_y$  на момент часу  $t_y$  визначаються з рисунку 4.3 і мають вигляд:

$$D_y = \sqrt{V_{ot}^2 t_y^2 + D^2 - 2DV_{ot} t_y \cos(K_{ot} - \alpha)}, \quad (4.3)$$

$$\alpha_y = K_{ot} + \arcsin \frac{D_d}{D_y}.$$

З набутих значень  $K_{otys}$  і  $K_{otyp}$  по відомій формулі (3.7) для руху суден на зустрічних курсах визначаються істинні курси ухилення:

$$K_{ys} = K_{otys} + \arcsin[p^{-1} \sin(K_c - K_{otys})],$$

$$K_{yp} = K_{otyp} + \arcsin[p^{-1} \sin(K_c - K_{otyp})], \quad (4.4)$$

де  $K_c$  - курс цілі.

Вирази (4.4) залежності курсів ухилення  $K_{ys}$  і  $K_{yp}$  від часу  $t_y$  можна розглядати як межі  $G_{ys}$  і  $G_{yp}$  на площині  $K_y \times t_y$ , що розділяють її на дві частини: допустимих поєднань, як крапок,  $(t_y, K_y)$ , для яких дистанція найкоротшого зближення  $D_{min}$  перевершує гранично - допустиму дистанцію  $D_d$ , тобто  $D_{min} > D_d$ , і неприпустимих крапок, для яких  $D_{min} < D_d$ . Область крапок  $(t_y, K_y)$  між межами  $G_{ys}$  і  $G_{yp}$  є областю  $Q_{K, ty}$  неприпустимих значень параметрів ухилення  $(t_y, K_y)$ , як показано на рисунку 4.4.

За допомогою виразів (4.2) ÷ (4.4) проводиться розрахунок меж  $G_{ys}$  і  $G_{yp}$  області  $Q_{K, ty}$  за допомогою алгоритму, представленого на рисунку 4.5. Відзначимо, що момент часу ухилення  $t_y$  змінюється від 0 до  $t_y^*$ . Зважаючи на те, що верхня межа часу  $t_y^*$  визначається залежно від співвідношення швидкостей судна  $V_o$  цілі  $V_c$ . Так, у разі переваги швидкості судна над швидкіс-



тю цілі, тобто  $V_o > V_c$ , верхня межа моменту часу  $t_y^*$  визначається моментом часу, коли судно досягає межі кола з радіусом  $D_d$ . Отже, справедливе співвідношення:

$$t_y^* = \frac{D - D_d}{V_{ot}}.$$

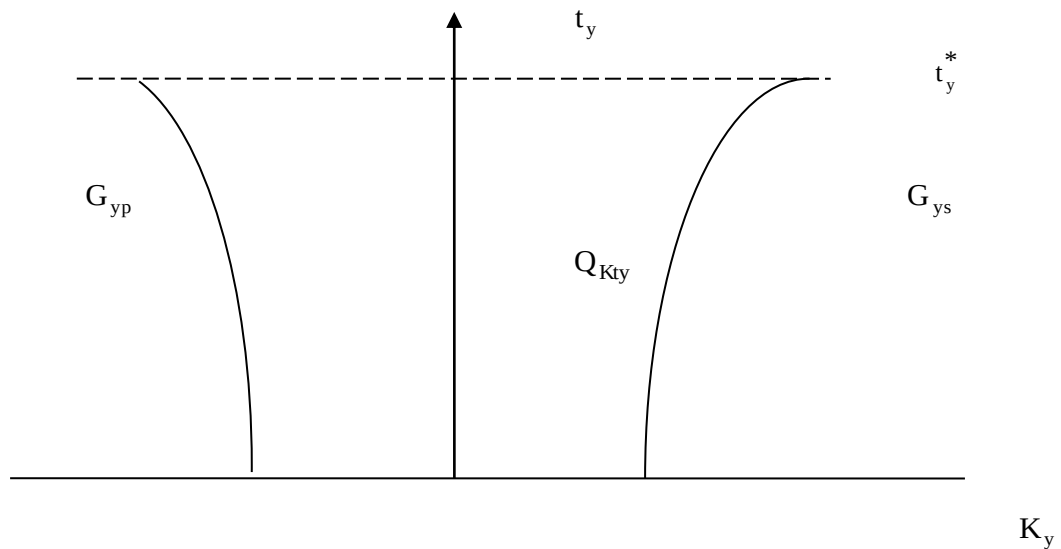


Рисунок 4.4 – Область  $Q_{K,ty}$  небезпечних значень параметрів ухилення

Для формування області неприпустимих значень параметрів ухилення  $Q_{K,ty}$  була розроблена комп'ютерна процедура інформаційної системи. Як приклад, розглянута ситуація небезпечного зближення судна з цілю, яка характеризується параметрами  $D = 3$  милі,  $\alpha = 88^\circ$ ,  $K_o = 45^\circ$ ,  $V_o = 23$  вузла,  $K_c = 315^\circ$ ,  $V_c = 20$  вузлів.

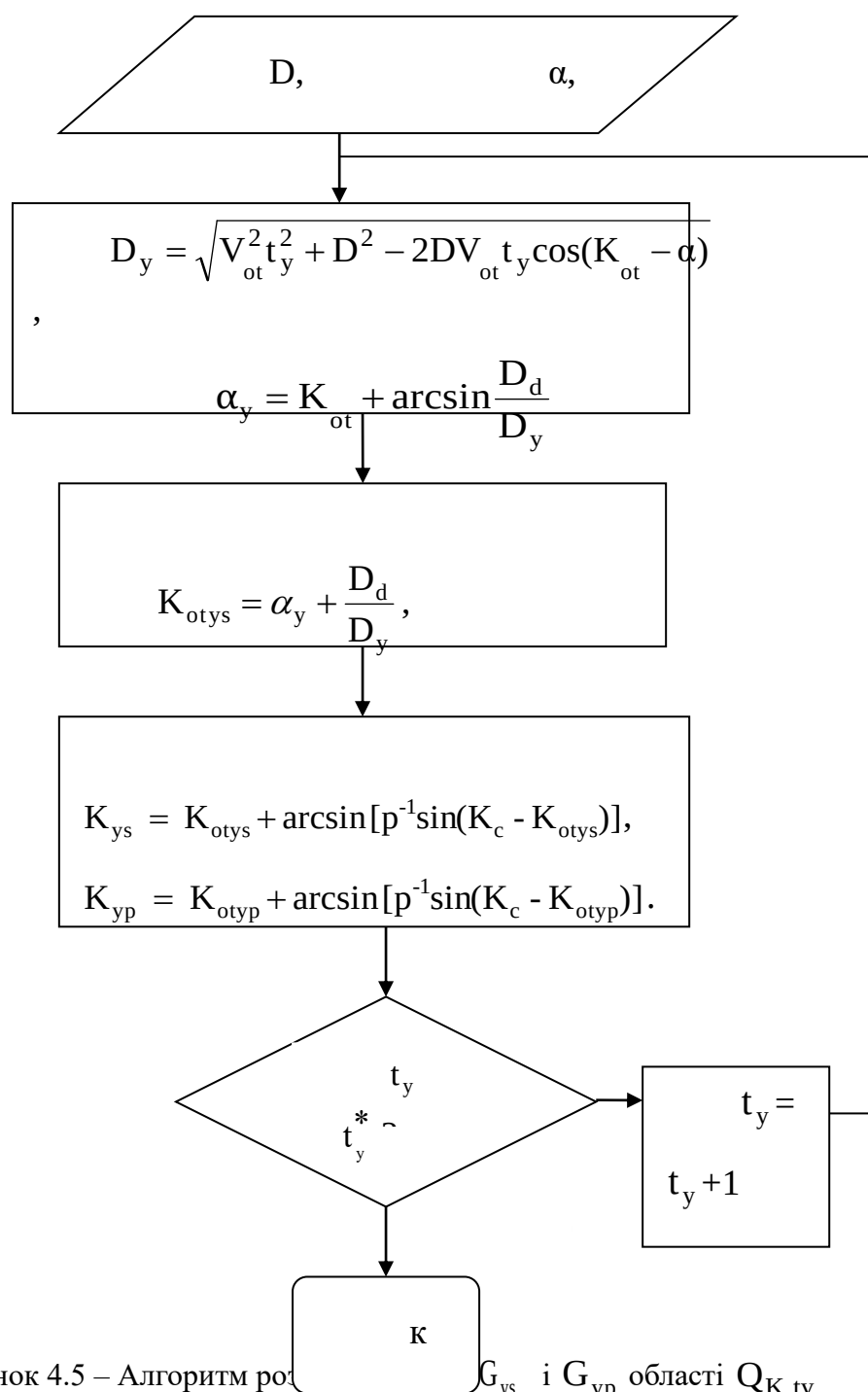
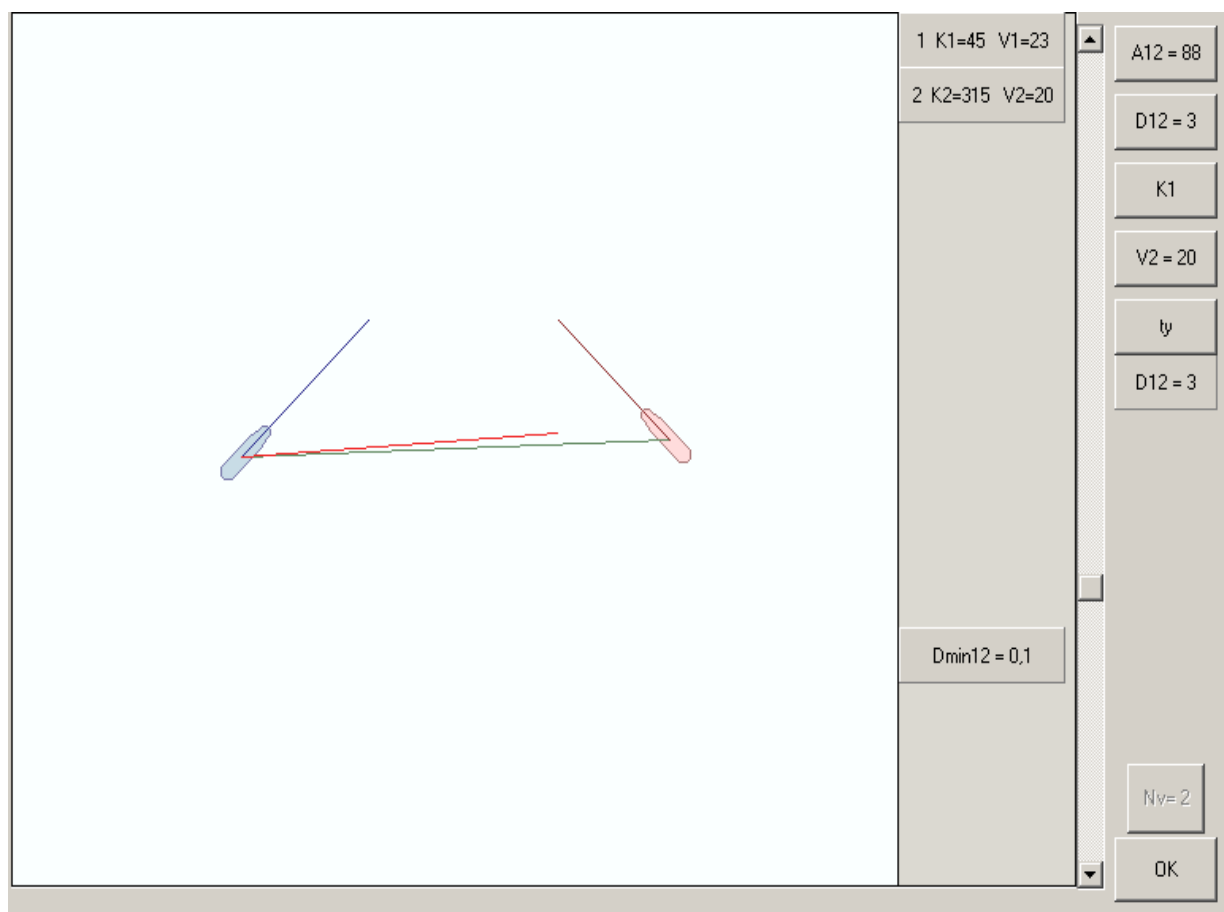


Рисунок 4.5 – Алгоритм розрахунку областей  $G_{ys}$  і  $G_{yp}$  області  $Q_{K,ty}$

Графічне відображення початкової ситуації небезпечного зближення судна з цілю показано на рисунку 4.6.



Риснок 4.6 –Початкова ситуація небезпечного зближення судна з цілю

За допомогою комп'ютерної процедури була сформована область неприпустимих значень параметрів ухилення (рис. 4.7). За віссю абсцис нанесені значення курсів ухилення, а за віссю ординат - значення часу ухилення  $t_y$ . Область  $Q_{K, t_y}$  розділена курсом  $K_{y\alpha}$  на дві частини, зважаючи на те, що курс  $K_{y\alpha}$  відповідає відносному курсу, який рівний пеленгу на цілю.

Очевидно:

$$K_{y\alpha} = \alpha + \arcsin[p^{-1}\sin(K_c - \alpha)].$$

У приведеному прикладі  $K_{y\alpha} = 49^\circ$ , праворуч від нього знаходиться межа  $G_{ys}$  ухилення управо, а зліва - межа  $G_{yp}$  ухилення вліво. За визначенням на межах дистанція найкоротшого зближення рівна гранично – допустимій дистанції зближення, яка в даному прикладі вибрана рівній 1 милі.

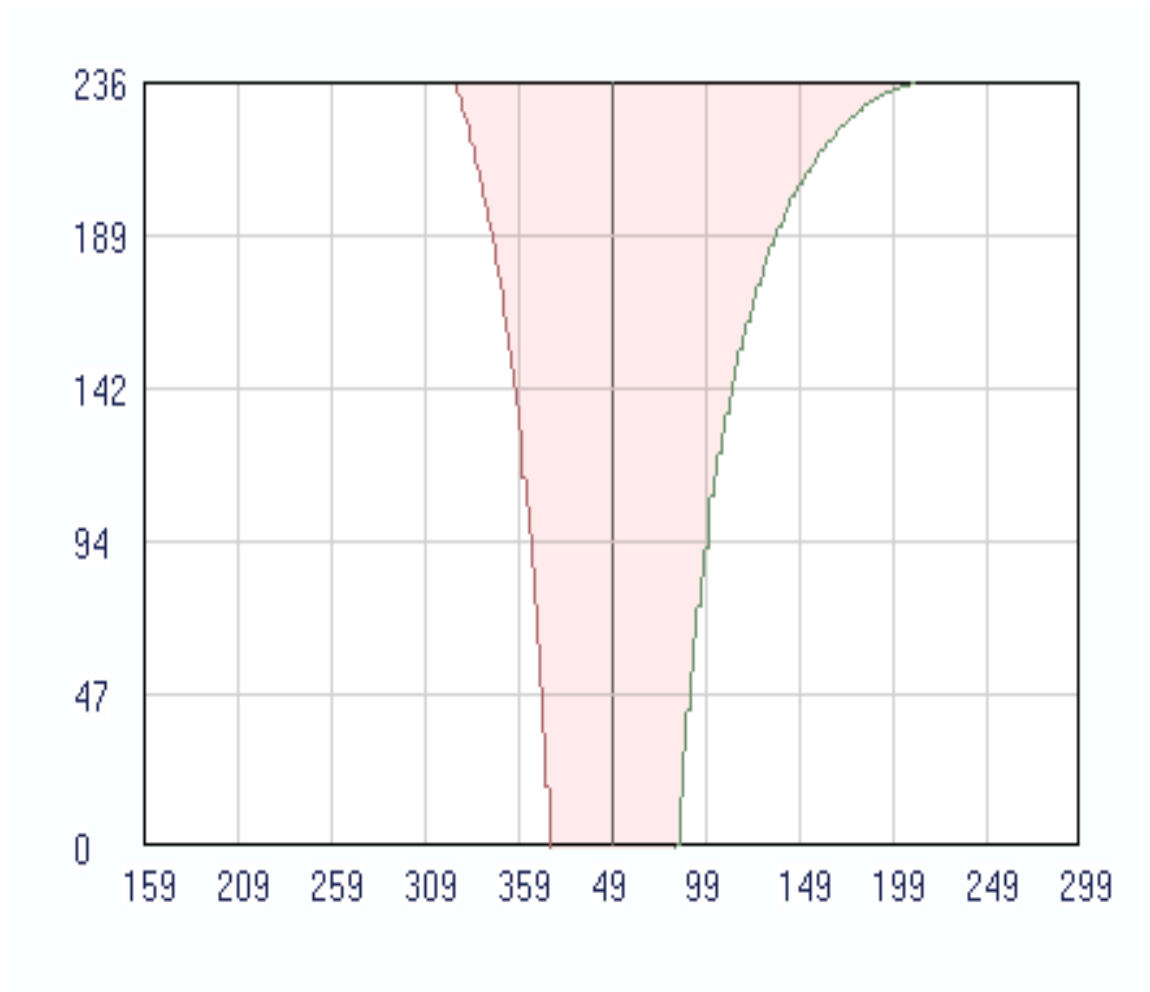


Рисунок 4.7. Межі  $G_{ys}$  і  $G_{yp}$  області  $Q_{K,ty}$  приведенного прикладу

На рисунку 4.8 показаний маневр ухилення судна зміною курсу управо з параметрами  $t_y = 15$  с і  $K_y = 86^\circ$ , які належать правій межі  $G_{ys}$  області  $Q_{K,ty}$ . Цим параметрам відповідає дистанція найкоротшого зближення  $L_m = 1$  милі, що підтверджує коректність способу формування області  $Q_{K,ty}$ .

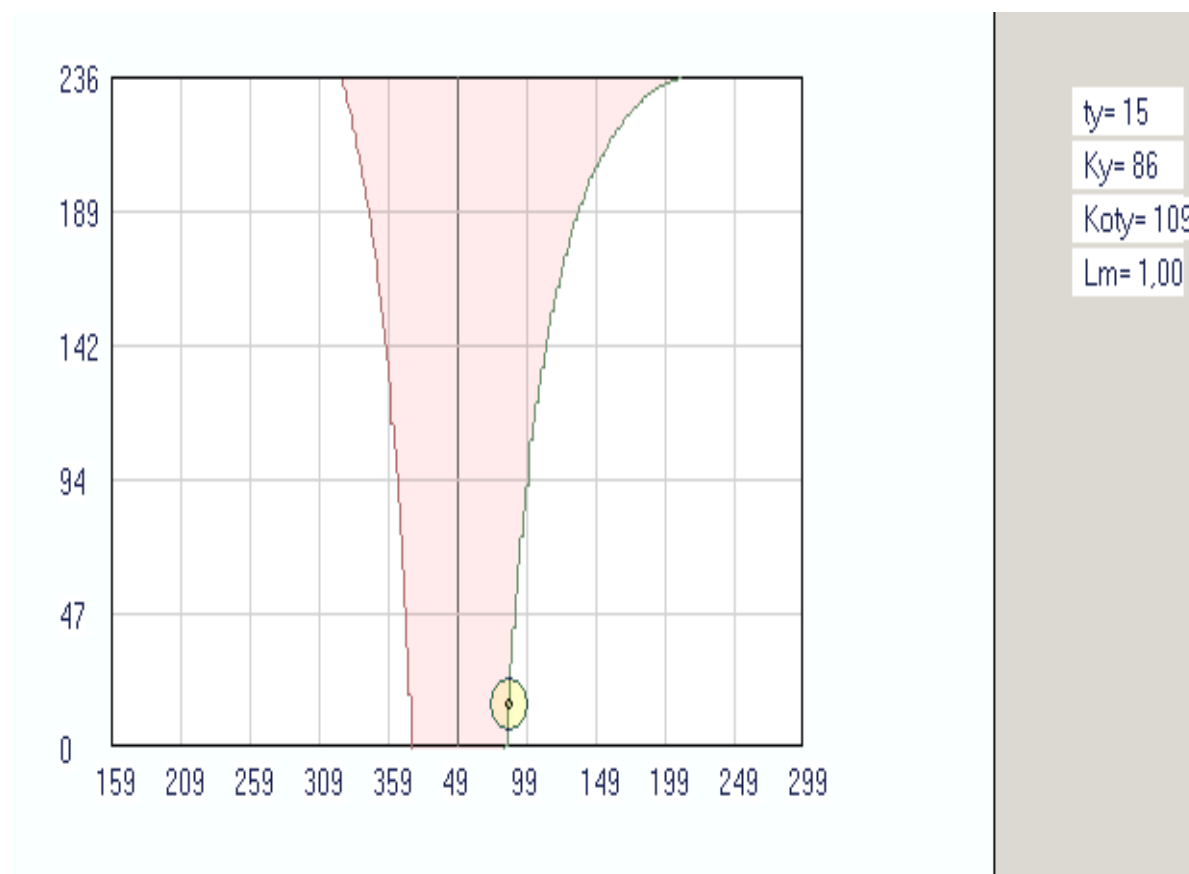


Рисунок 4.8 – Вибір безпечних параметрів ухилення зміною курсу управо

Точка з параметрами ухилення  $t_y = 123$  с і  $K_y = 107^\circ$  (рис. 4.9), також належить правій межі  $G_{ys}$  і забезпечує зближення судна з цілю на дистанцію  $L_m = 1$  милі.

Якщо вибрати точку, що належить лівій межі, наприклад, з параметрами  $t_y = 96$  с і  $K_y = 5^\circ$  (рис. 4.10), то дистанція найкоротшого зближення  $L_m = 1$  милі рівна гранично - допустимій дистанції зближення.

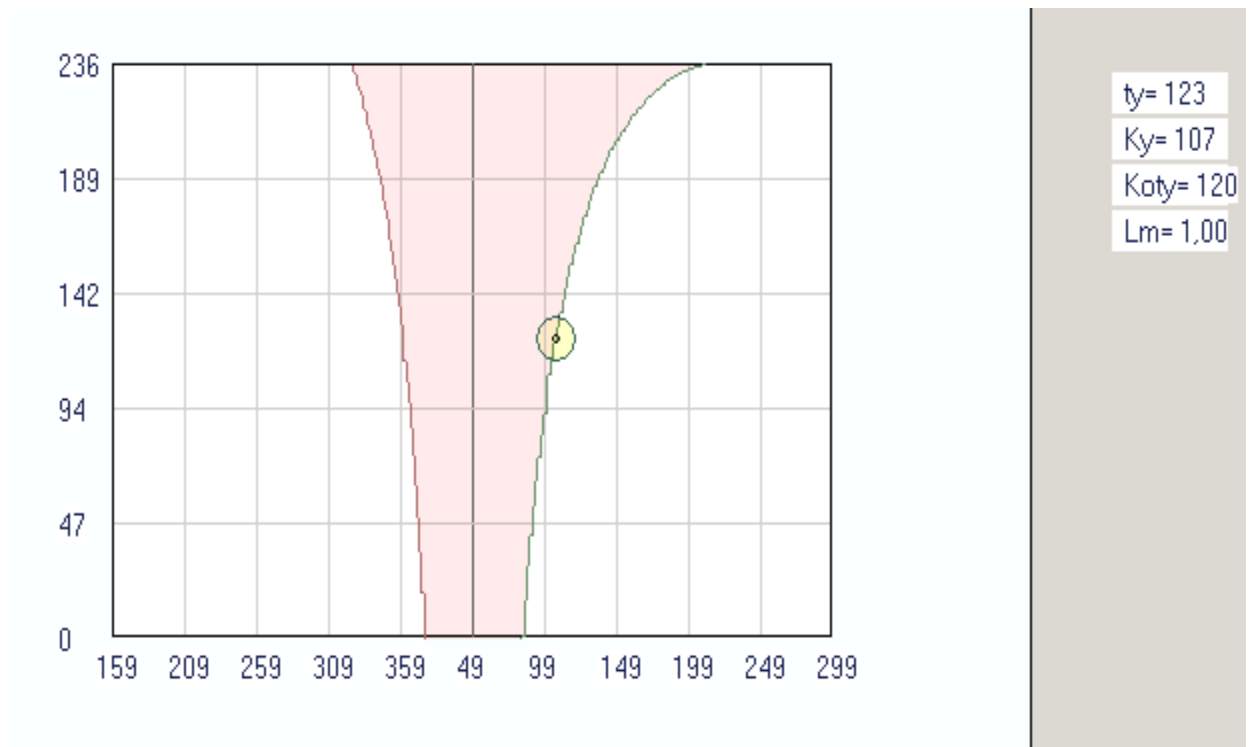


Рисунок 4.9 – Вибір параметрів ухилення  $t_y = 123$  с і  $K_y = 107^\circ$

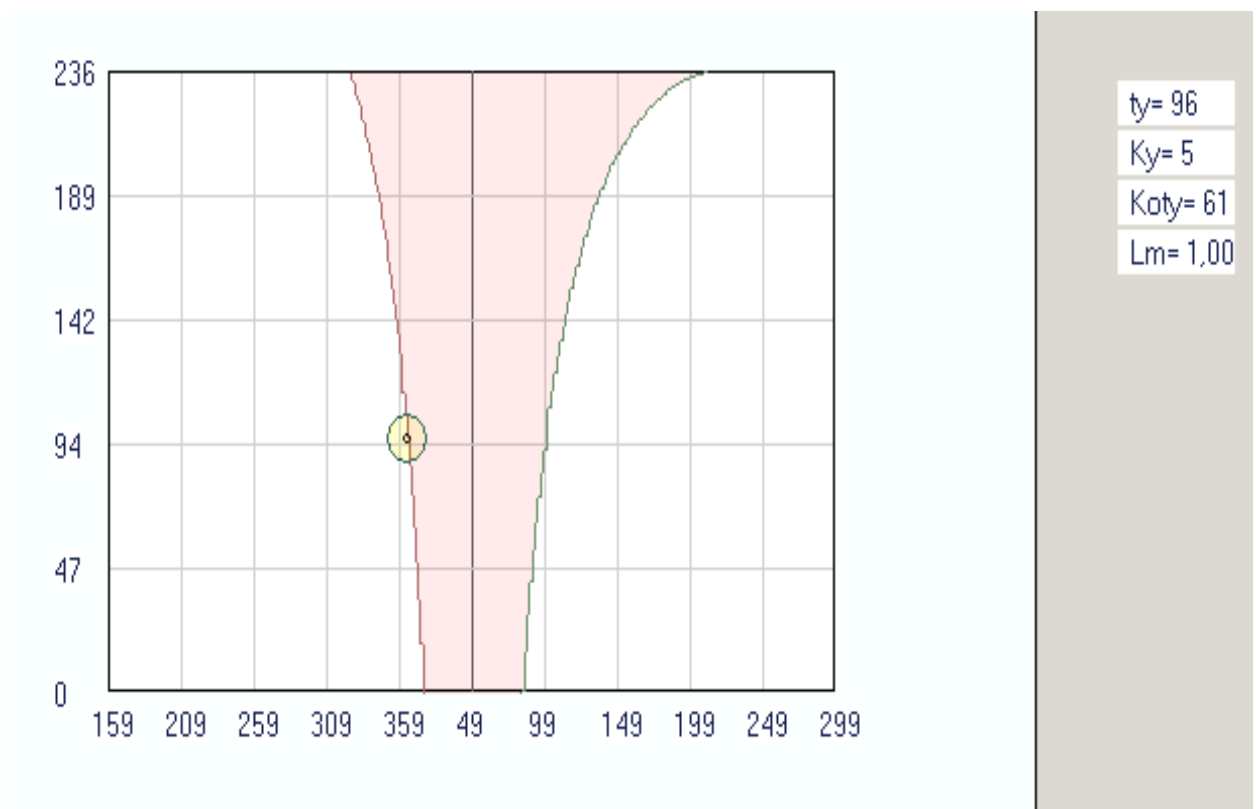
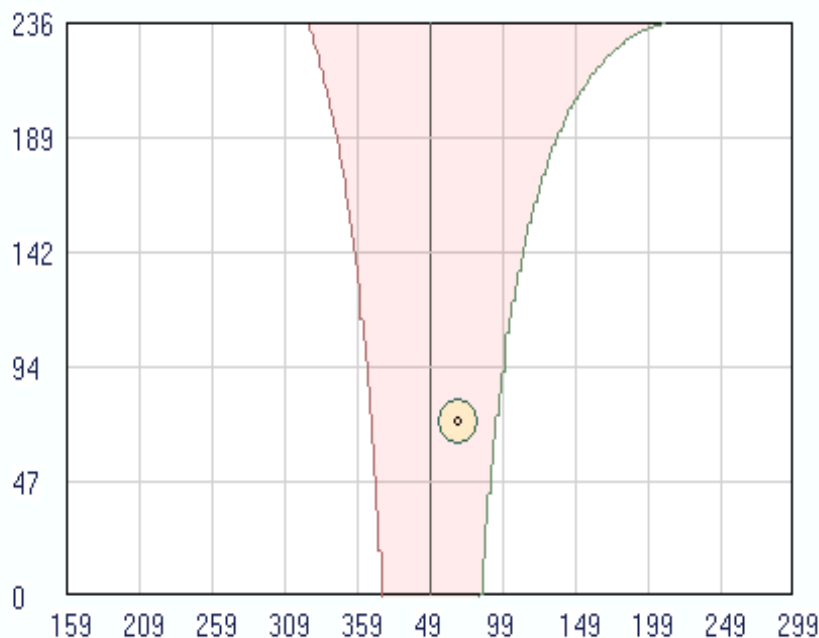


Рисунок 4.10 – Безпечні параметри ухилення зміною курсу вліво

Під час вибору точки з параметрами ухилення поза областю  $Q_{K, t_y}$  дистанція найкоротшого зближення, якщо ж точка знаходиться в області, то  $L_m < 1$ . Так, на рисунку 4.11 показана точка з параметрами  $t_y = 72$  с і  $K_y = 68^\circ$ , що належить області, під час вибору якої дистанція  $L_m = 0,42$  миль, що менше прийнятої гранично - допустимої дистанції зближення. Отже, за допомогою запропонованої області неприпустимих значень параметрів ухилення  $Q_{K, t_y}$  можна вибрати оптимальні значення часу  $t_y$  і курсу  $K_y$  ухилення судна за його небезпечного зближення з цілю. розходження



$t_y = 72$   
 $K_y = 68$   
 $K_{oty} = 99$   
 $L_m = 0,42$

Рисунок 4.11 – Неприпустимі параметри ухилення зміною курсу управо

Другим етапом стратегії розходження є вихід судна на задану траєкторію руху після ухилення. Зважаючи на те, що на цьому етапі дистанція між судном і цілю також не повинна бути менше гранично - допустимої дистанції зближення. Параметрами виходу є курс  $K_b$  і час повороту  $t_b$  на цей курс. Як раніше було показано, курс виходу  $K_b$  залежить від початкового курсу судна, і  $K_b$  доцільно вибирати рівним  $K_{bs} = K_o - 30^\circ$  під час ухилення судна упра-

во і  $K_{bp} = K_o + 30^\circ$  під час ухилення судна вліво. Момент часу повороту  $t_{b*}$  на курс виходу, при якому дистанція найкоротшого зближення рівна гранично - допустимій дистанції зближення  $D_d$  розраховується за допомогою формули, одержаної в попередньому підрозділі:  
під час ухилення судна управо:

$$t_{bs*} = t_y + \frac{\Delta_b D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{otbs}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otbs} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(\tilde{K}_{oty} - K_{otbs})} \quad (4.5)$$

під час ухилення судна вліво:

$$t_{bp*} = t_y + \frac{\Delta_b D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{otbp}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otbp} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(\tilde{K}_{oty} - K_{otbp})} \quad (4.6)$$

Отже, коли курс виходу  $K_b$  не змінюється за часу  $t_{b*}$ , то тоді час  $t_{b*}$  є функцією курсу ухилення  $K_y$ . А значить, в цьому випадку можна розглядати як функцію виразів (4.5) і (4.6) області  $Q_{K, tb}$  на площині  $K_y \times t_b$ , межі якої  $G_{bs}$  і  $G_{bp}$ . Область  $K_y$  і  $t_b$  має безпечну і неприпустимі області (рис. 4.12), зазначимо, що між цими межами знаходяться допустимі значення параметрів.

Для вирішення задачі визначення областей  $Q_{K, tb}$  допустимих значень параметрів  $K_y$  і  $t_b$  була розроблена комп'ютерна програма, що виконує розрахунок та визначення меж  $G_{bs}$  і  $G_{bp}$ , а потім відновить на екран монітору області  $Q_{K, tb}$  допустимих значень параметрів  $K_y$  і  $t_b$ . На рисунку 4.13 наведена область  $Q_{K, tb}$  для раніше розглянутої ситуації небезпечного зближення (рис. 4.6).



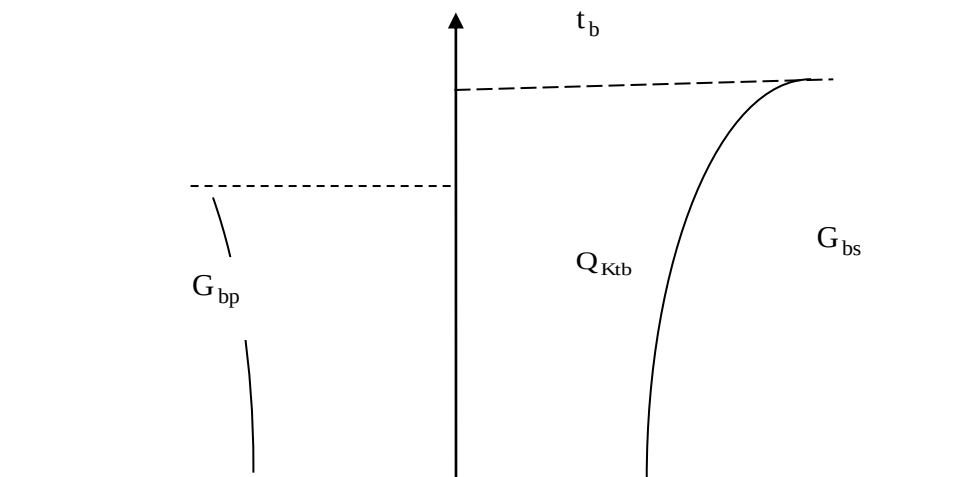


Рисунок 4.12 – Область  $Q_{K, tb}$  допустимих значень параметрів  $K_y$  і  $t_b$

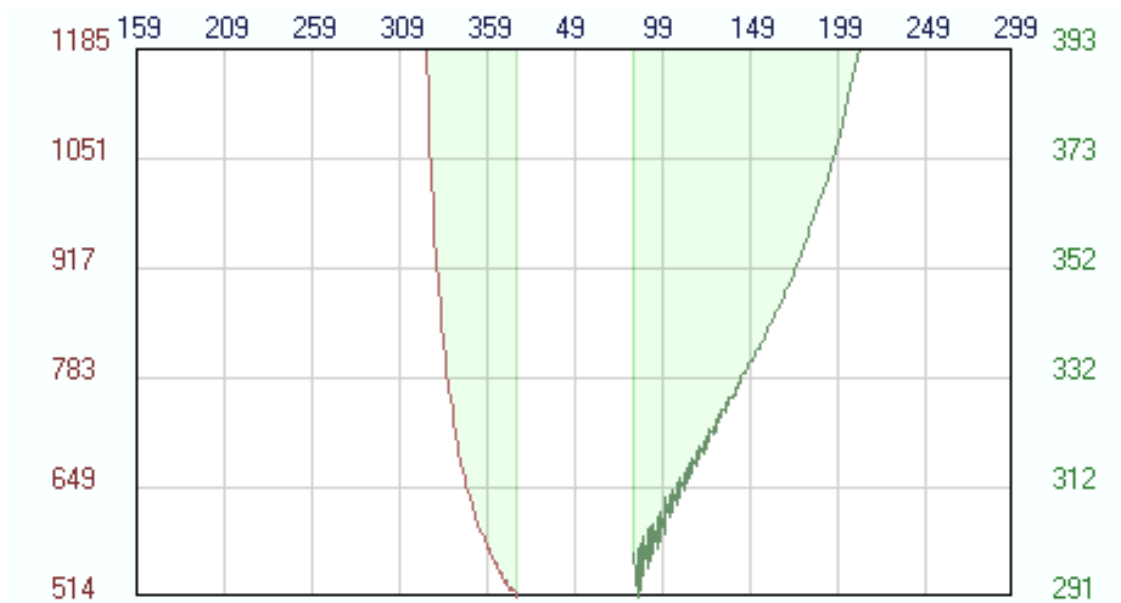


Рисунок 4.13 – Область  $Q_{K, tb}$  приведенного прикладу ситуації зближення

За віссю абсцис розташовуються значення курсів ухилення судна, а за віссю ординат - значення часу початку виходу  $t_{bs*}$  і  $t_{bp*}$ . Оскільки межі зміни  $t_{bs*}$  і  $t_{bp*}$  різні, то за віссю ординат є дві шкали різного масштабу: справа для  $t_{bs*}$  зеленого кольору і зліва для  $t_{bp*}$  червоного кольору. На рисунку 4.14 показаний вибір точки повороту до заданої траєкторії з параметрами  $K_y = 92^\circ$  і

$t_b = 302$  с, яка знаходиться на правій межі області  $Q_{K, tb}$ . При даних параметрах мінімальна дистанція зближення  $L_m = 1$  милі відповідає заданій, що підтверджує коректність процедури формування області  $Q_{K, tb}$ .

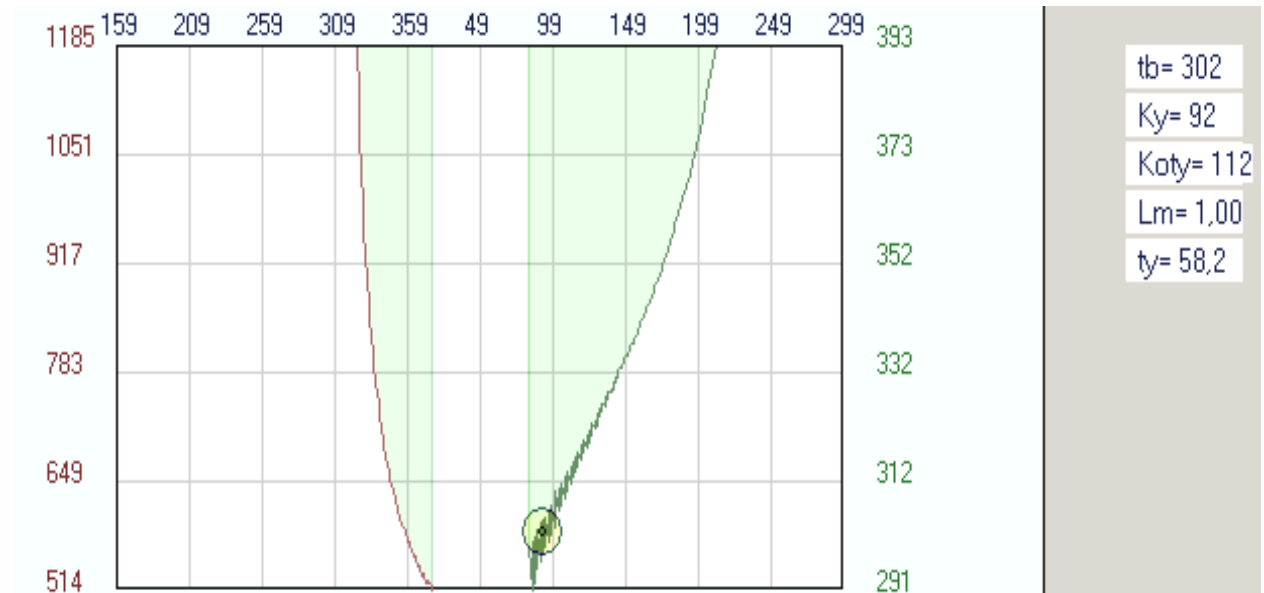


Рисунок 4.14 – Вибір безпечного маневру виходу під час ухилення судна управо

Аналогічно, вибір точки на лівій межі  $G_{bp}$  області (рис. 4.15) з параметрами  $K_y = 328^\circ$  і  $t_b = 997$  с забезпечує дистанцію найкоротшого зближення на етапі виходу  $L_m = 1$  милі. Зважаючи на те, що, якщо ухилення починається у момент часу  $t_y = 230$  с, то найкоротше зближення на дистанцію 1 миля забезпечується як на етапі ухилення, так і на етапі виходу. У разі, коли точка з параметрами  $K_y = 324^\circ$  і  $t_b = 914$  с не належить області  $Q_{K, tb}$  (рис. 4.16), найкоротше зближення менше передбаченого і складає  $L_m = 0,65$  милі. Якщо ж точка з параметрами  $K_y = 132^\circ$  і  $t_b = 383$  с (рис. 4.17).

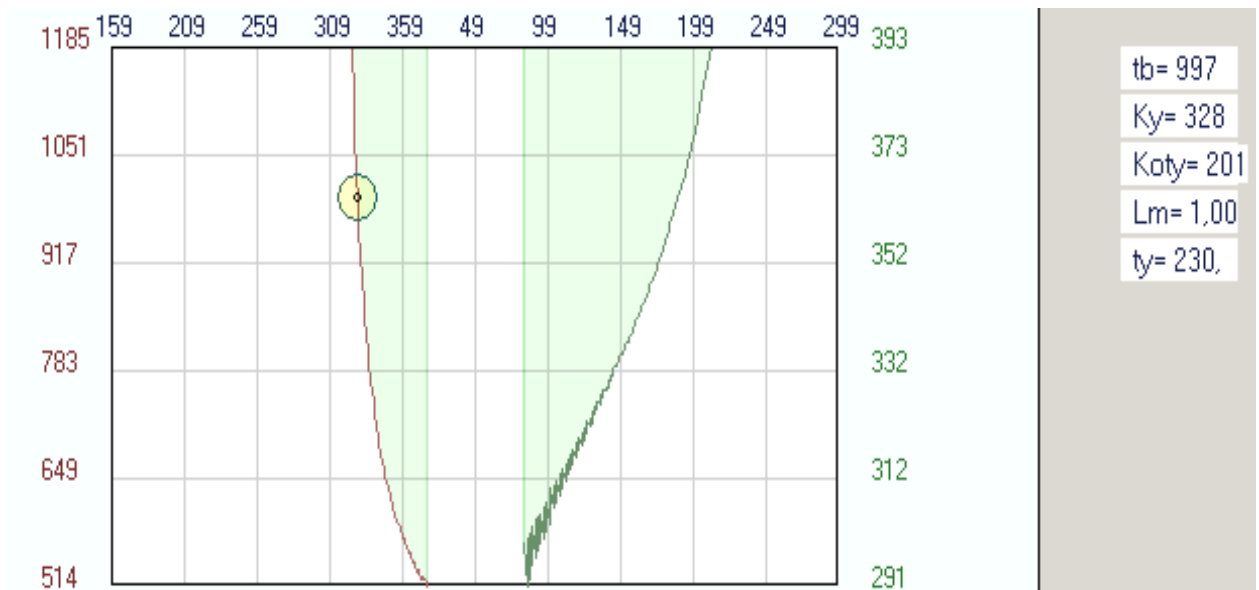


Рисунок 4.15 – Вибір безпечного маневру виходу під час ухилення судна вліво

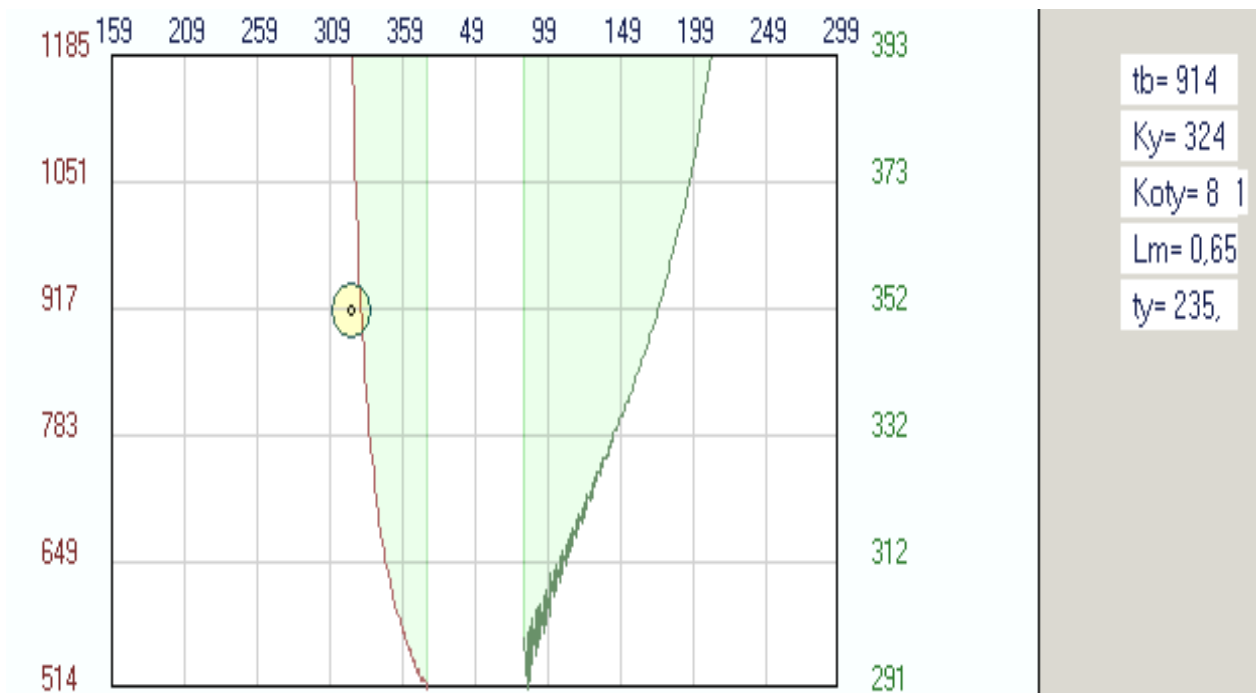


Рисунок 4.16 – Неприпустимі параметри під час ухилення судна вліво

належить області, то найкоротше зближення відбувається на дистанції більшої, ніж гранично - допустима дистанція зближення, і складає  $L_m = 1,63$  миль.



Рисунок 4.17 – Допустимі параметри під час ухилення судна управо

У разі, коли швидкість судна менше швидкості цілі, тобто  $V_o < V_c$ , то, як показано в попередньому розділі, відносний курс під час маневрування судна може змінюватися в секторі, обмеженому мінімальним  $K_{otmin}$  і максимальним  $K_{otmax}$  курсами, які визначають граничні значення часу ухилення управо  $t_{ys}^*$  і вліво  $t_{yp}^*$ . Значення екстремальних відносних курсів  $K_{otmax}$  і  $K_{otmin}$  визначаються виразами:

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

$$\text{де } \rho = V_o / V_c.$$

Використовуючи вираз (4.1) і підставляючи в нього значення  $K_{otmax}$  і  $K_{otmin}$ , одержимо вирази для розрахунку граничних значень  $t_{ys}^*$  і  $t_{yp}^*$ :

$$t_{ys}^* = \frac{D \sin(K_{otmax} - \alpha) - D_d}{V_{otn} \sin(K_{otn} - K_{otmax})},$$

$$t_{yp}^* = \frac{D \sin(K_{otmin} - \alpha) + D_d}{V_{otn} \sin(K_{otn} - K_{otmin})}.$$

Відзначимо, що область  $Q_{K,ty}$  може бути використана для оцінки небезпеки ситуації зближення судна з цілю. Перш за все, слід зробити розрахунок верхньої межі часу початку ухилення. Якщо його значення негативне, то стандартний маневр розходження неможливий і формування області  $Q_{K,ty}$  не має сенсу.

У разі, коли верхня межа часу початку ухилення позитивна, то проводиться розрахунок меж  $G_{ys}$  і  $G_{yp}$  області  $Q_{K,ty}$ . Потім аналізуємо приналежність точки з координатами  $K_y = K_o$  і  $t_y = 0$  області  $Q_{K,t}$ . Якщо згадана точка не належить до області, тобто  $(K_o, 0) \notin Q_{K,ty}$ , то зближення судна з цілю безпечне, оскільки дистанція найкоротшого зближення більша гранично - допустимої дистанції зближення, і не виникає необхідність у виборі маневру розходження.

Інакше, тобто  $(K_o, 0) \in Q_{K,ty}$ , ситуація зближення є небезпечною і за допомогою області  $Q_{K,ty}$  необхідно вибрати безпечні параметри ухилення.

Як приклад небезпечного зближення судна з меншою швидкістю і цілі розглянемо ситуацію з параметрами  $D = 3.3$  милі,  $\alpha = 150^\circ$ ,  $K_o = 109^\circ$ ,  $V_o = 18$  вузлів,  $K_c = 356^\circ$ ,  $V_c = 20$  вузлів, яка показана на рисунку 4.18. Для даної ситуації небезпечного зближення, а область  $Q_{K,ty}$  (рис. 4.19). Граничне значення моменту часу ухилення управо складає  $t_{ys}^* = 228$  с, а під час ухилення вліво -  $t_{yp}^* = 176$  с. Тому, як впливає з рисунку 4.19, ліва межа області  $Q_{K,ty}$  коротша за праву межу.

Переконаємося, що на межі області неприпустимих значень параметрів ухилення  $Q_{K,ty}$  дистанція найкоротшого зближення рівна гранично - допустимій дистанції зближення, яка прийнята в даному прикладі рівної 1 милі.

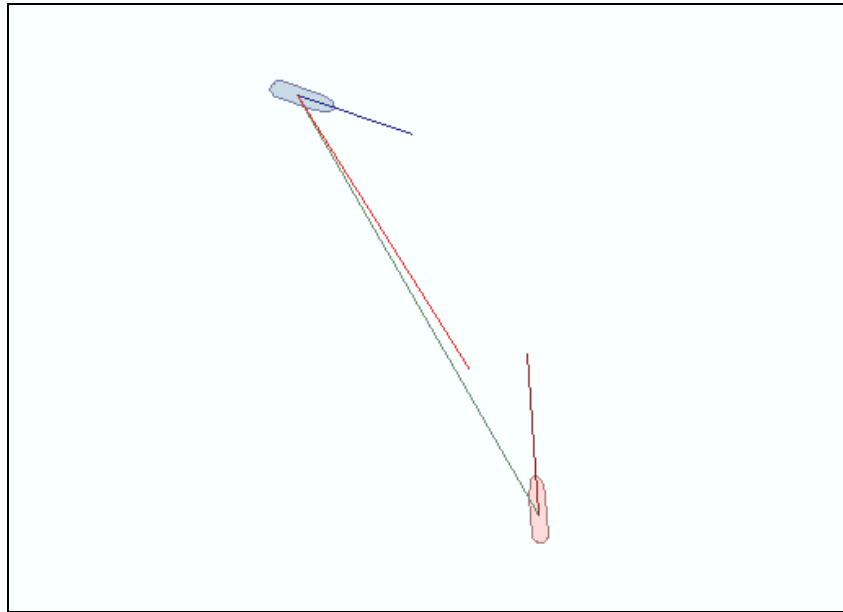


Рисунок 4.18 – Ситуація небезпечного зближення коли  $V_0 < V_c$

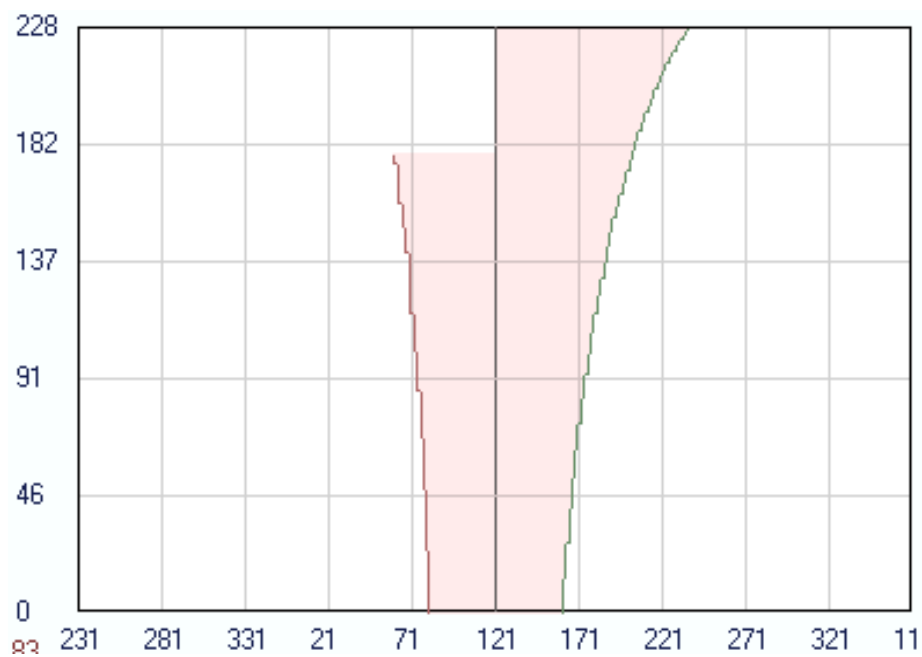


Рисунок 4.19 – Область неприпустимих значень параметрів ухилення  $Q_{K,ty}$

На рисунку 4.20 показаний вибір точки з параметрами ухилення  $t_y = 1$  с і  $K_y = 160^\circ$ , належній правій межі  $G_{ys}$  області, за якої досягається зближення судна з цілю на дистанцію  $L_m = 1$  милі, а на рисунку 4.21 точка з параметра-

ми ухилення  $t_y = 91$  с і  $K_y = 175^\circ$  також належить правій межі  $G_{ys}$  області, за якої  $L_m = 1$  милі.

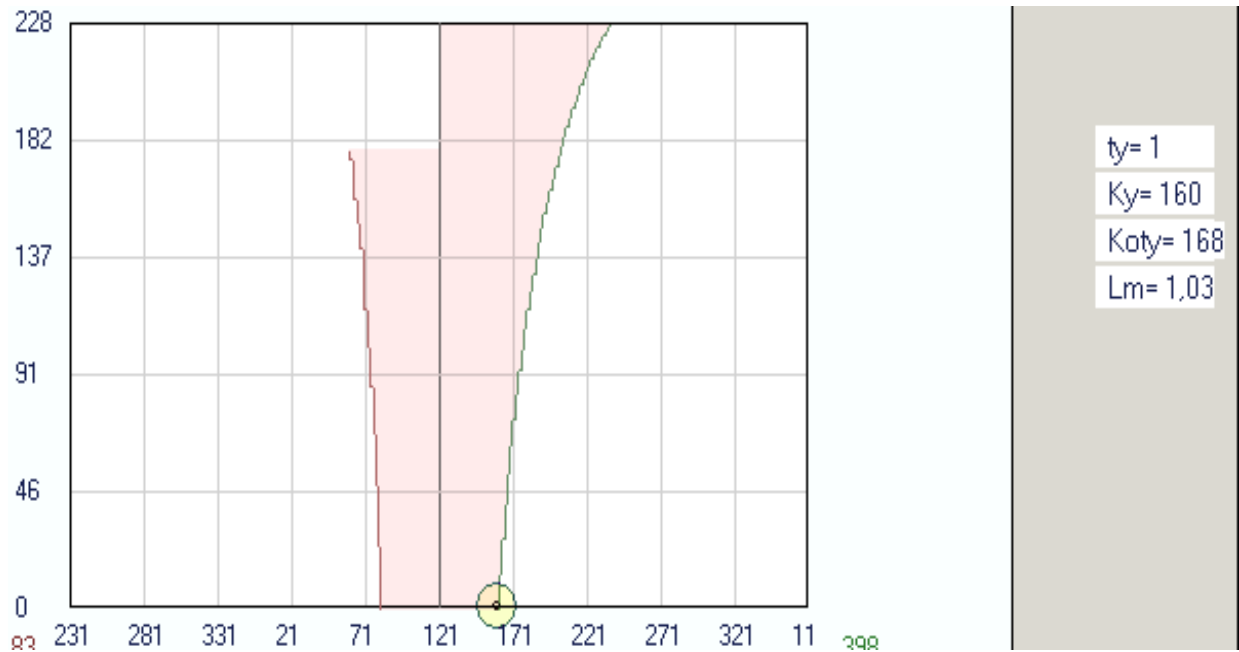


Рисунок 4.20 – Вибір параметрів ухилення  $t_y = 1$  с і  $K_y = 160^\circ$

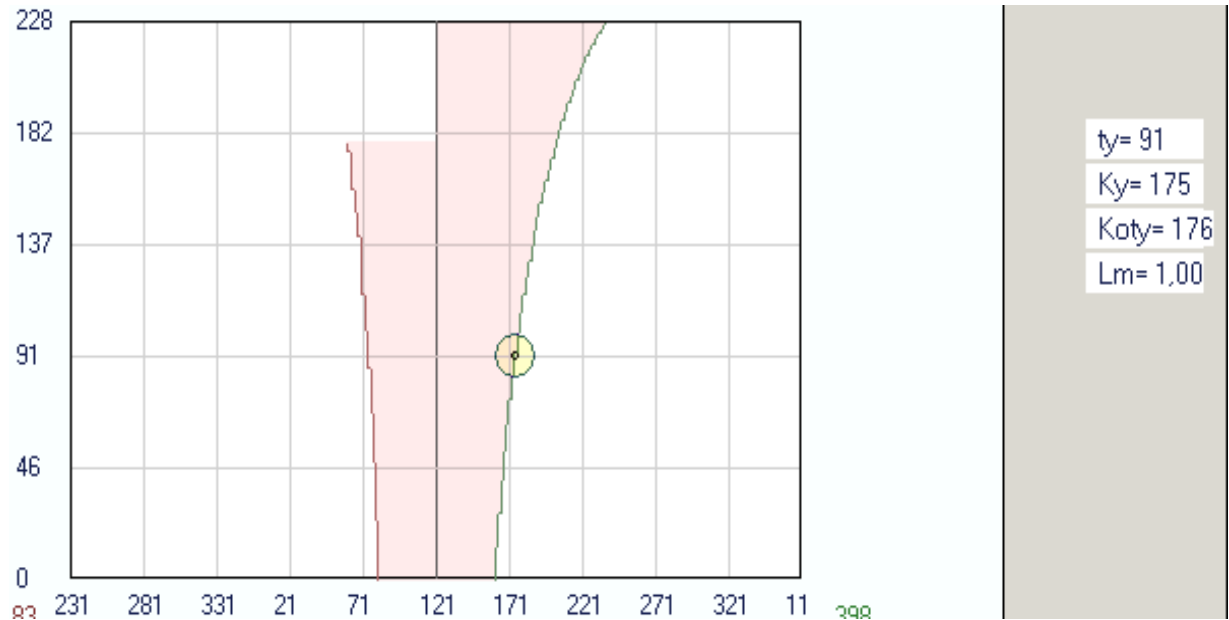


Рисунок 4.21 – Вибір параметрів ухилення  $t_y = 91$  с і  $K_y = 175^\circ$

Точка з параметрами  $t_y = 182$  с і  $K_y = 208^\circ$  у верхній частині правої межі області (рис. 4.22), належить межі, і для неї  $L_m = 1$  милі. Тестування лівої

межі області  $Q_{K, t_y}$  для випадку  $V_o < V_c$  показане на рисунку 4.23, на якому вибрана точка з параметрами ухилення  $t_y = 1$  с і  $K_y = 82^\circ$ ,

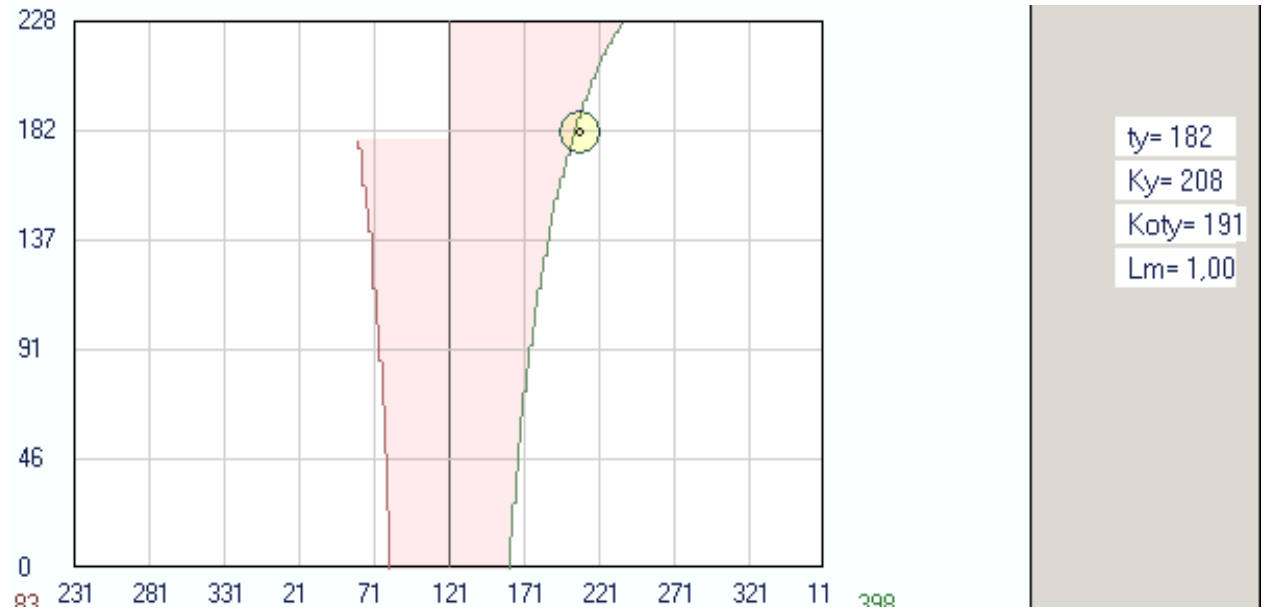


Рисунок 4.22 – Вибір параметрів ухилення  $t_y = 182$  с і  $K_y = 208^\circ$

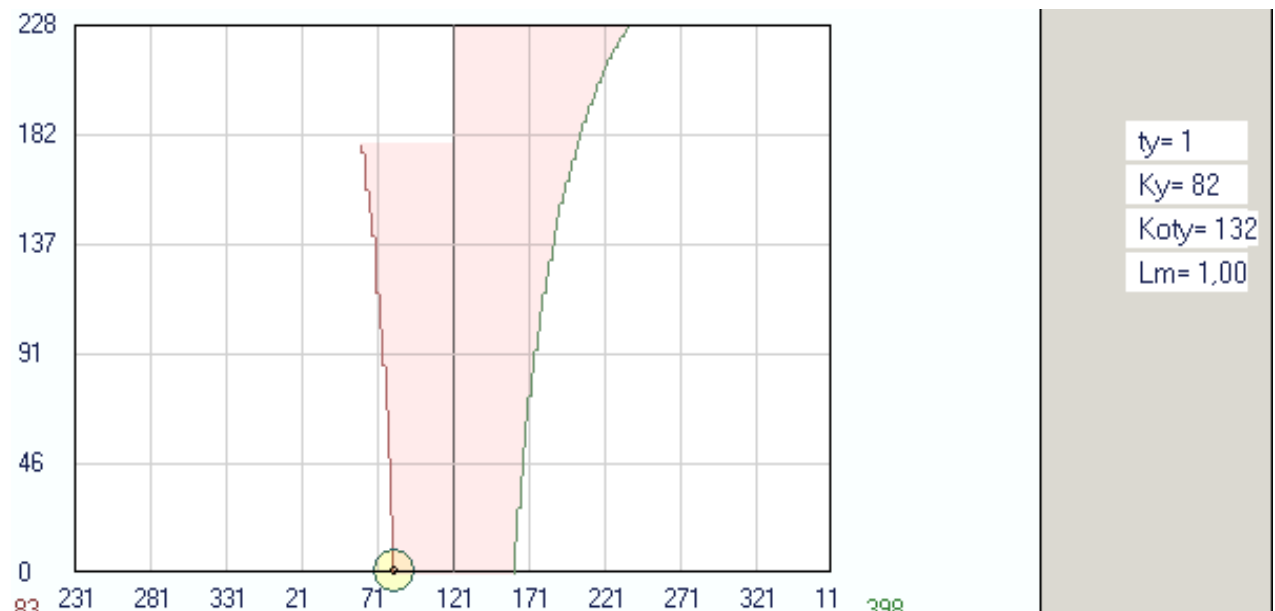


Рисунок 4.23 – Вибір параметрів ухилення  $t_y = 1$  с и  $K_y = 82^\circ$

яка розташована в нижній частині лівої межі області  $Q_{K, t_y}$  і для неї  $L_m = 1$  милі.



На рисунку 4.24 показана точка з параметрами ухилення  $t_y = 94$  с і  $K_y = 72^\circ$ , розташована в середній частині лівої межі і належить їй. Під час вибору вказаних параметрів ухилення дистанція найкоротшого зближення  $L_m = 1$  милі.

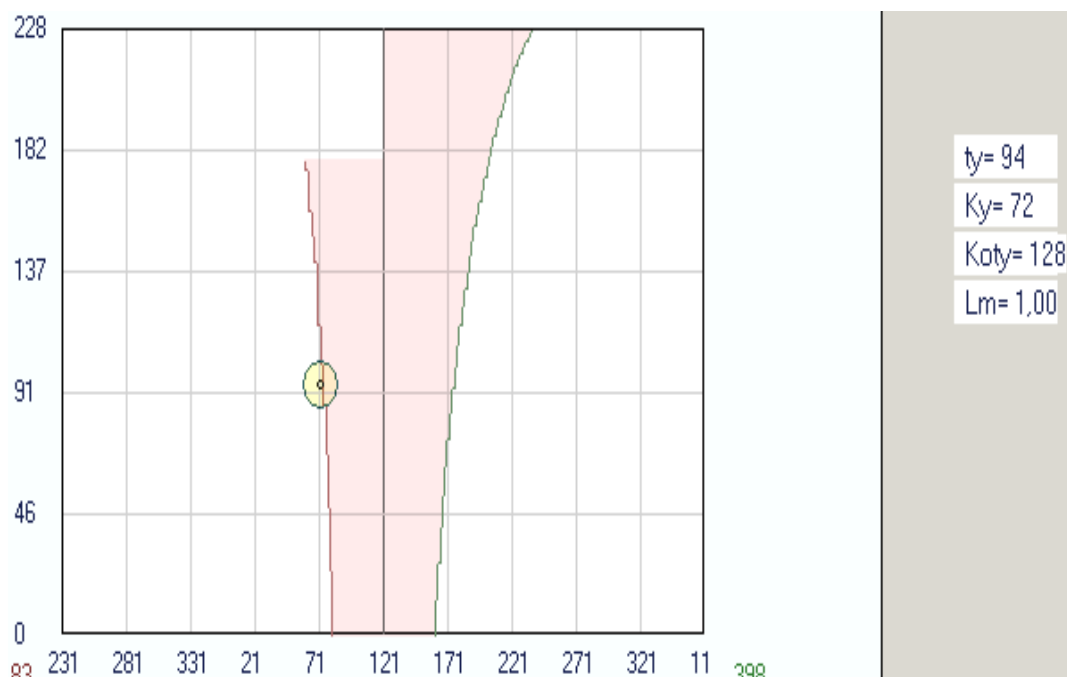


Рисунок 4.24 – Параметри ухилення  $t_y = 94$  с і  $K_y = 72^\circ$

Як завершальна точка тестування розглянута точка, з координатами  $t_y = 176$  с і  $K_y = 54^\circ$  (рис. 4.25), яка є граничною точкою лівої межі області  $Q_{K, t_y}$  і забезпечує дистанцію найкоротшого зближення рівну по величині гранично - допустимій дистанції, тобто  $L_m = 0,99$  милі.

Отже, проведена перевірка дистанцій найкоротшого зближення на межі області  $Q_{K, t_y}$  показала коректність способу формування згаданої області.

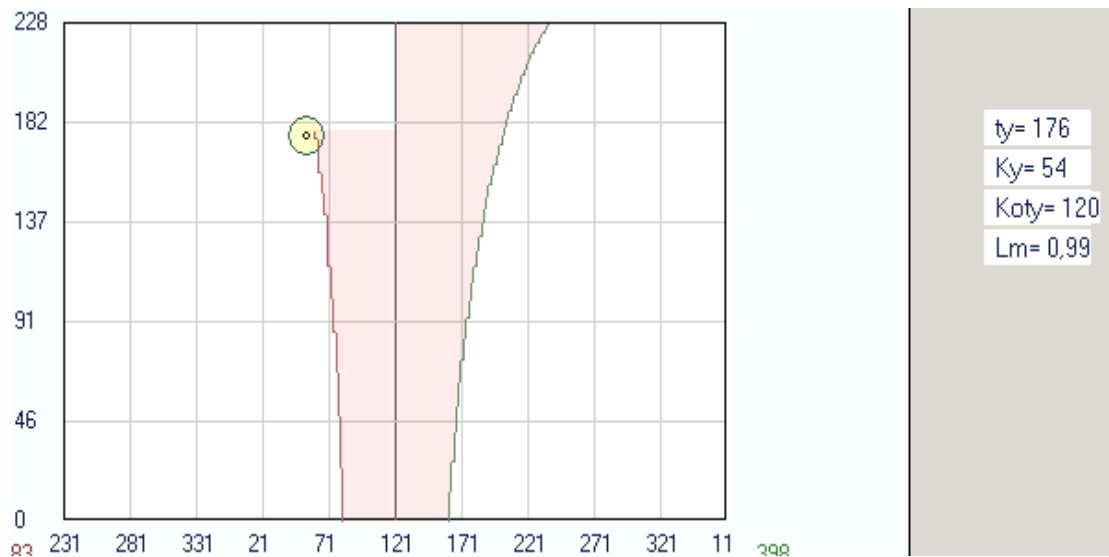


Рисунок 4.25 – Параметри ухилення  $t_y = 176$  с і  $K_y = 54^\circ$

Для даної ситуації небезпечного зближення судна з цілю у разі  $V_o < V_c$  комп'ютерної процедурою були розраховані межі і сформована область  $Q_{K, tb}$  допустимих значень параметрів  $K_y$  і  $t_b$ , яка показана на рисунку 4.26. Враховуючи, що граничні значення часу повороту судна на ділянку виходу до заданої траєкторії руху під час ухилення судна управо і вліво відрізняються по величині, на рисунках приводяться дві шкали: з правого боку для ухилення судна управо і з лівого боку для ухилення судна вліво.

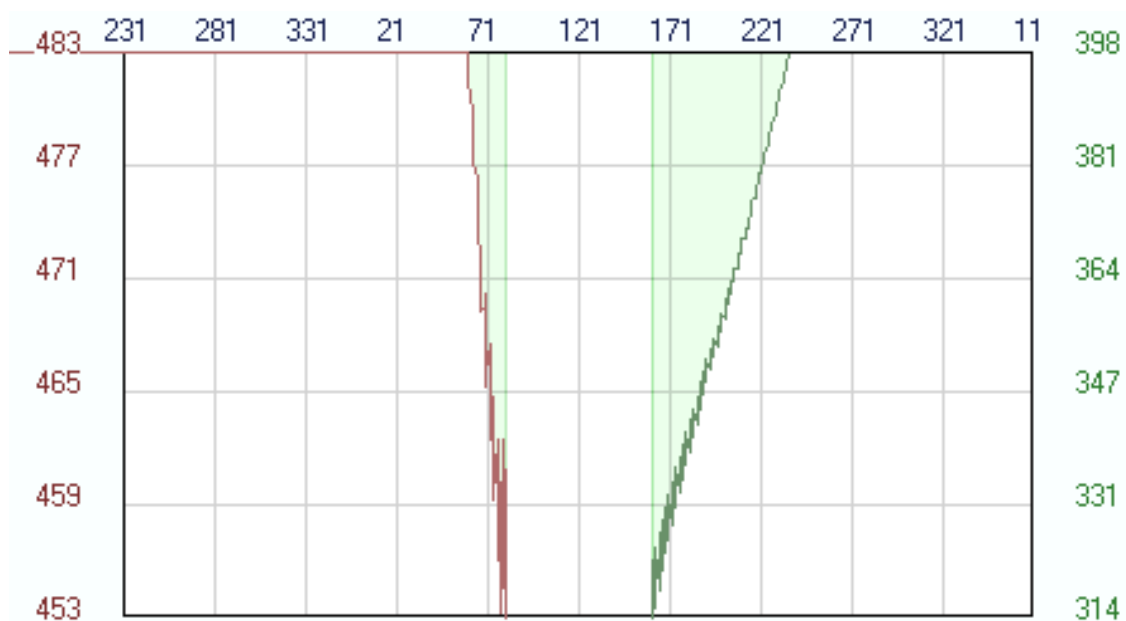
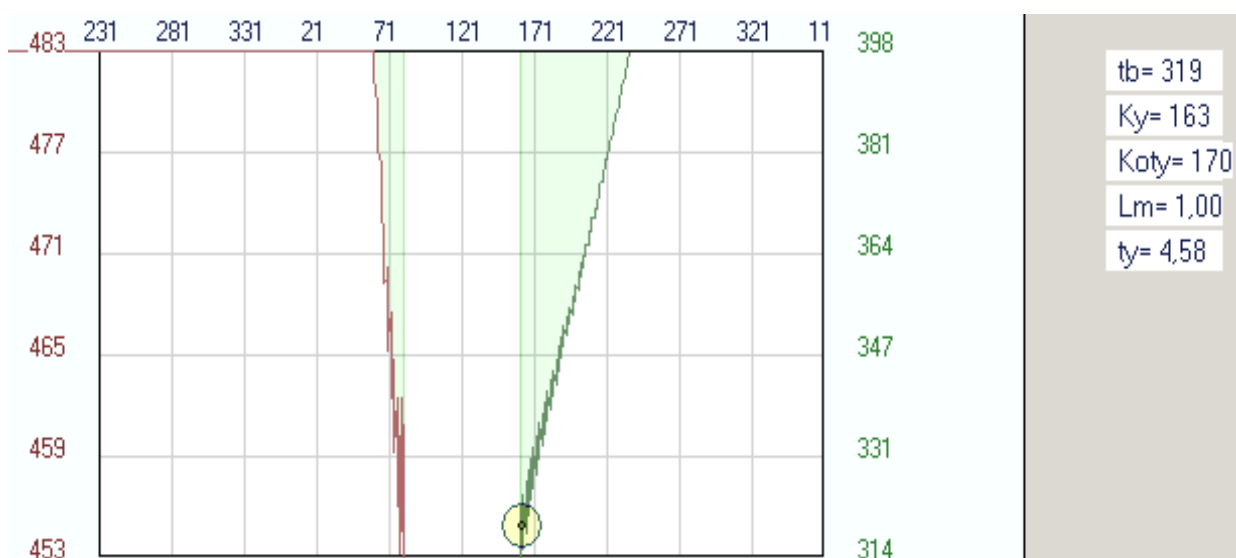


Рисунок 4.26 – Область  $Q_{K, tb}$  допустимих значень параметрів  $K_y$  і  $t_b$

На рисунку 4.27 показаний вибір точки правої межі області  $Q_{K, tb}$  в її нижній частині з параметрами  $K_y = 163^\circ$  і  $t_b = 319$  с, зважаючи на те, що курс ухилення  $K_y$  відповідає часу ухилення  $t_y = 4$  с. При даних параметрах маневру розходження мінімальна дистанція зближення судна і цілі на обох етапах ухилення і повернення на програмну траєкторію рівна гранично - допустимій дистанції зближення.



Рисунку 4.27 – Вибір безпечного маневру виходу під час ухилення судна управо

На рисунку 4.28 для тестування правої межі області  $Q_{K, tb}$  вибрана точка з параметрами  $K_y = 202^\circ$  і  $t_b = 355$  с, що знаходиться в середній частині межі. Для даних параметрів дистанція найкоротшого зближення на етапі виходу  $L_m = 1,06$  милі. Завершальна точка тестування (рис. 4.29) правої межі  $Q_{K, tb}$

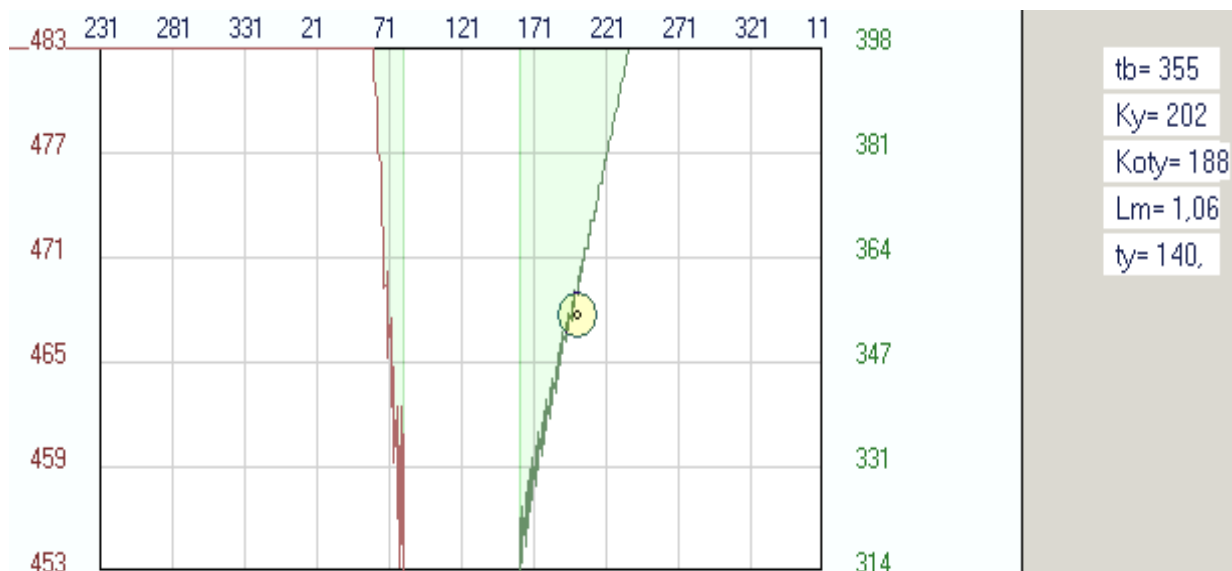


Рисунок 4.28 – Перевірка точки межі з параметрами  $K_y = 202^\circ$  і  $t_b = 355$  с

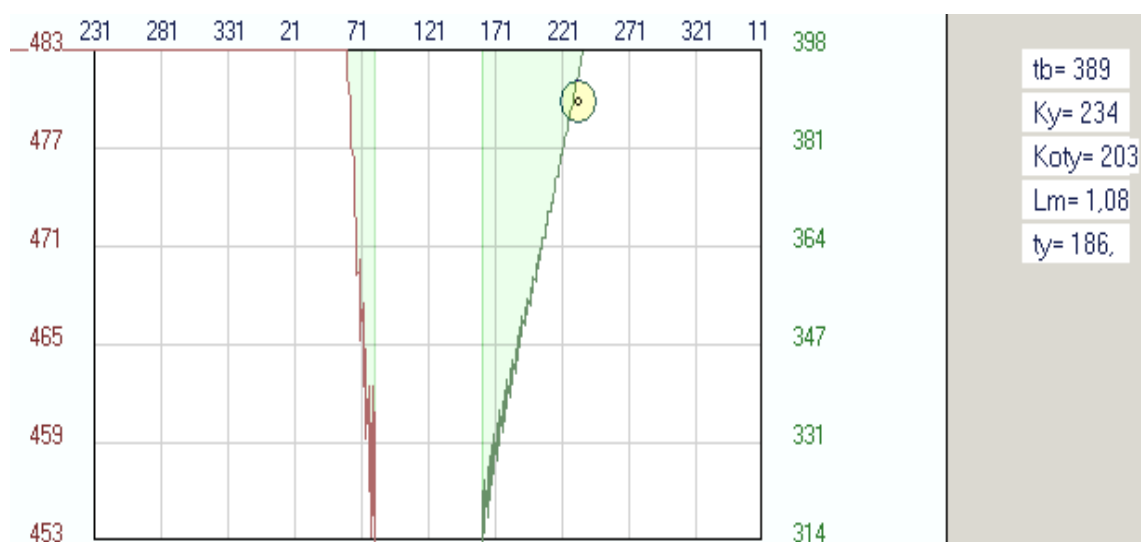


Рисунок 4.29 – Завершальна точка тестування правої межі області  $Q_{K, tb}$

знаходиться у верхній частині області і характеризується параметрами  $K_y = 234^\circ$  і  $t_b = 389$  с, які забезпечують розбіжність судна з метою в дистанції  $L_m = 1,08$  милі.

Надалі вироблялася перевірка коректності розрахунку лівої межі області  $Q_{K, tb}$ . Початкова точка тестування знаходиться в нижній частині лівої межі області, як показано на рисунку 4.30, і характеризується параметрами  $K_y = 78^\circ$  і  $t_b = 456$  з. В цьому випадку на етапі виходу дистанція найкорот-

шого зближення  $L_m$  рівна 0,99 милі, що практично відповідає гранично - допустимій дистанції зближення.

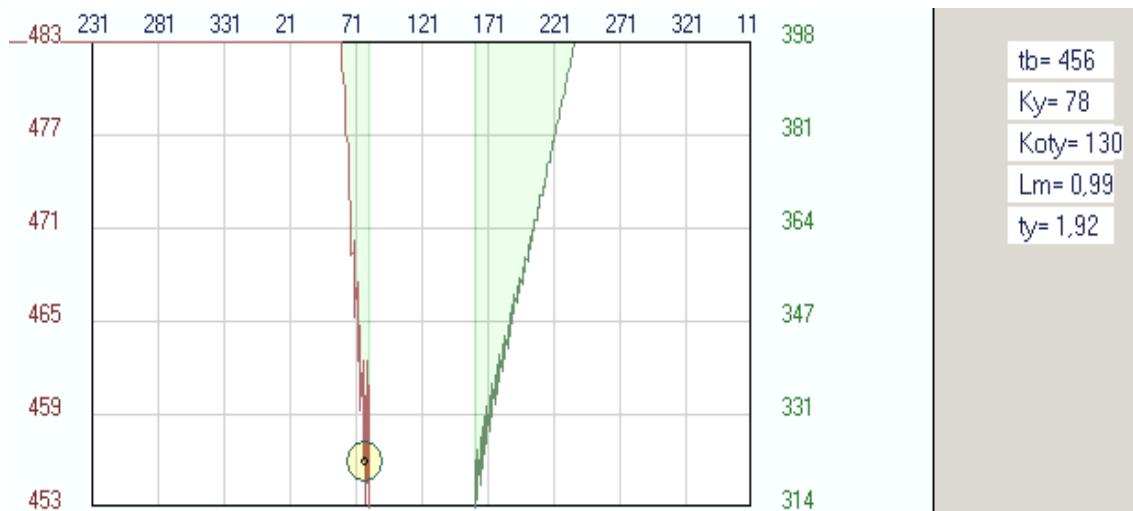


Рисунок 4.30 – Нижня точка тестування лівої межі області  $Q_{K, tb}$

Чергова перевірка точки лівої межі здійснюється в її середній частині, а її координати  $K_y = 71^\circ$  і  $t_b = 470$  (рис. 4.31). В результаті розрахунку виявилося, що на етапі виходу дистанція найкоротшого зближення  $L_m$  рівна 1,00 милі. Третя точка тестування вибрана у верхній частині лівої межі області  $Q_{K, tb}$  з параметрами  $K_y = 67^\circ$  і  $t_b = 479$  с, реалізація яких забезпечує дистанцію найкоротшого зближення  $L_m$  на етапі виходу на задану траєкторію руху, рівну 1,00 милі, що виходить з рисунку 4.32.

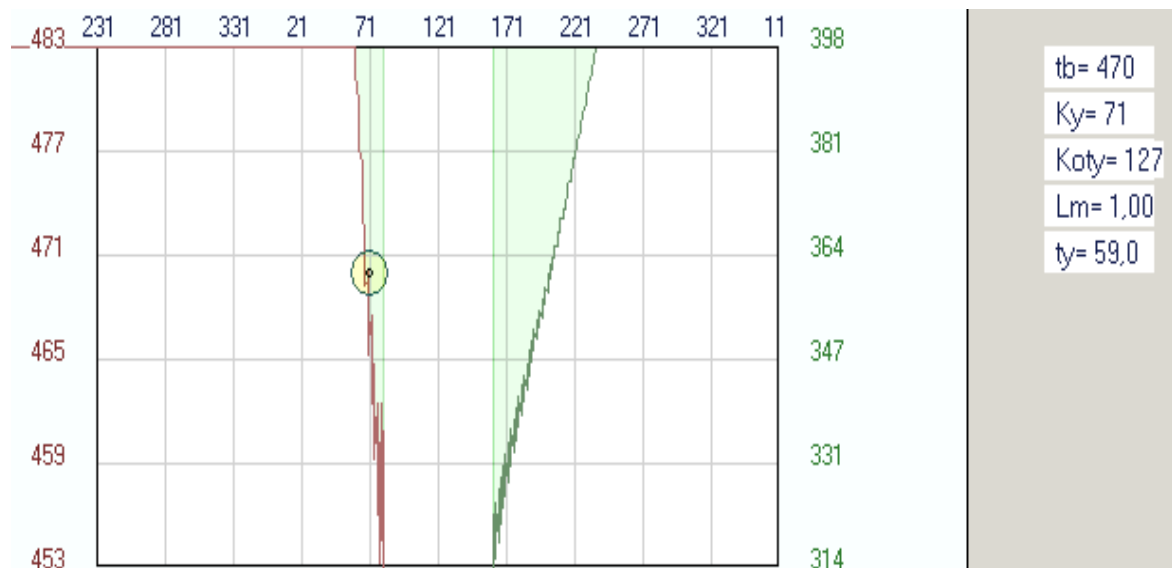
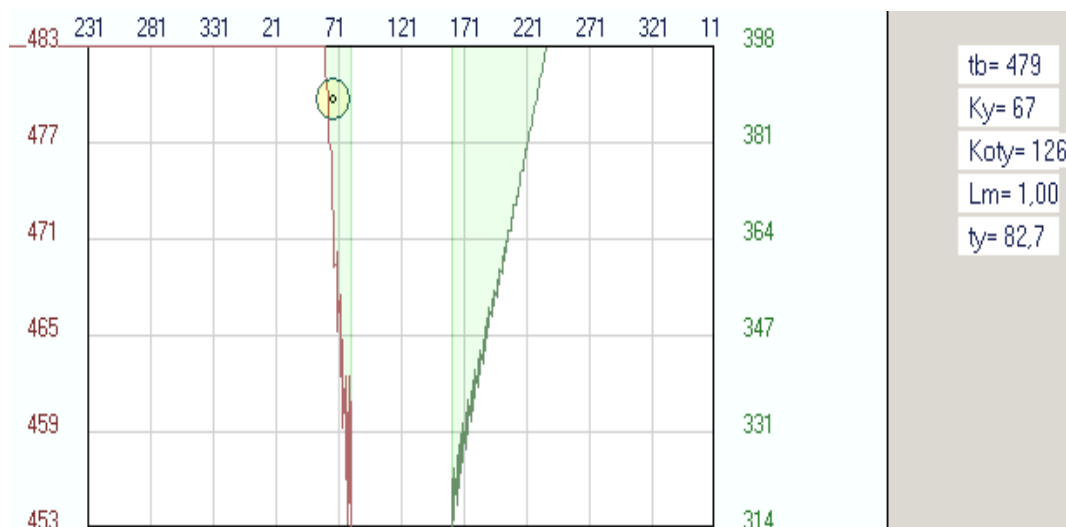


Рисунок 4.31 – Перевірка точки межі з параметрами  $K_y = 71^\circ$  і  $t_b = 470$  сРисунок 4.32 – Третя точка межі з параметрами  $K_y = 67^\circ$  і  $t_b = 479$  с

Може виникнути ситуація, коли через чинники, що заважають, необхідно змінити курсу виходу  $K_b$ , збільшуючи його значення щодо мінімальної величини  $K_{bmin} = K_o - \text{sig}30$ . Тому виникає необхідність визначення залежності моментів часу  $t_b$  і  $t_k$  щодо вибраного курсу  $K_b$ .

З цією метою була розроблена комп'ютерна процедура, що дозволяє вирішувати вказану задачу. Як приклад практичної реалізації даної процедури, використана раніше приведена перша ситуація небезпечного зближення судна з цілю для випадку, коли ухилення проводилося управо з параметрами  $t_y = 6$  с і  $K_y = 85^\circ$ . На рисунку 4.33 представлена у верхній частині екрану залежності моментів часу  $t_b$  і  $t_k$  від курсу виходу  $K_b$ .

У нижній частині екрану показана початкова ситуація небезпечного зближення судна з цілю: зліва в режимі істинного руху, а в правій частині – в режимі відносного руху. Зважаючи на те, що в цьому режимі показаний пеленг на ціль, початковий відносний курс і граничні безпечні відносні курси ухилення управо і ухилення вліво.

Проведемо перевірку коректності процедури залежності моментів часу  $t_b$  і  $t_k$  від курсу виходу  $K_b$  для ухилення судна управо. Якщо точка маневру

виходу належить функціональній кривій, то дистанція найкоротшого зближення судна з цілю на етапі виходу судна на програмну траєкторію руху повинна бути рівній гранично - допустимій дистанції зближення. Для перевірки вибираємо точку на початку кривої з координатами  $t_b = 316$  с і  $K_b = 11^\circ$  (рис. 4.34). Потім, як показано на рисунку 4.35, вибрана точка в середній частині кривої з координатами  $t_b = 324$  с,  $K_b = 356^\circ$  і, нарешті, третя точка в кінці кривої (рис. 4.36), координати якої  $t_b = 324$  с і  $K_b = 356^\circ$ . Для кожної з крапок найкоротша дистанція зближення судна з ціллю 1,14 милі, що практично дорівнює гранично - допустимій дистанції зближення.

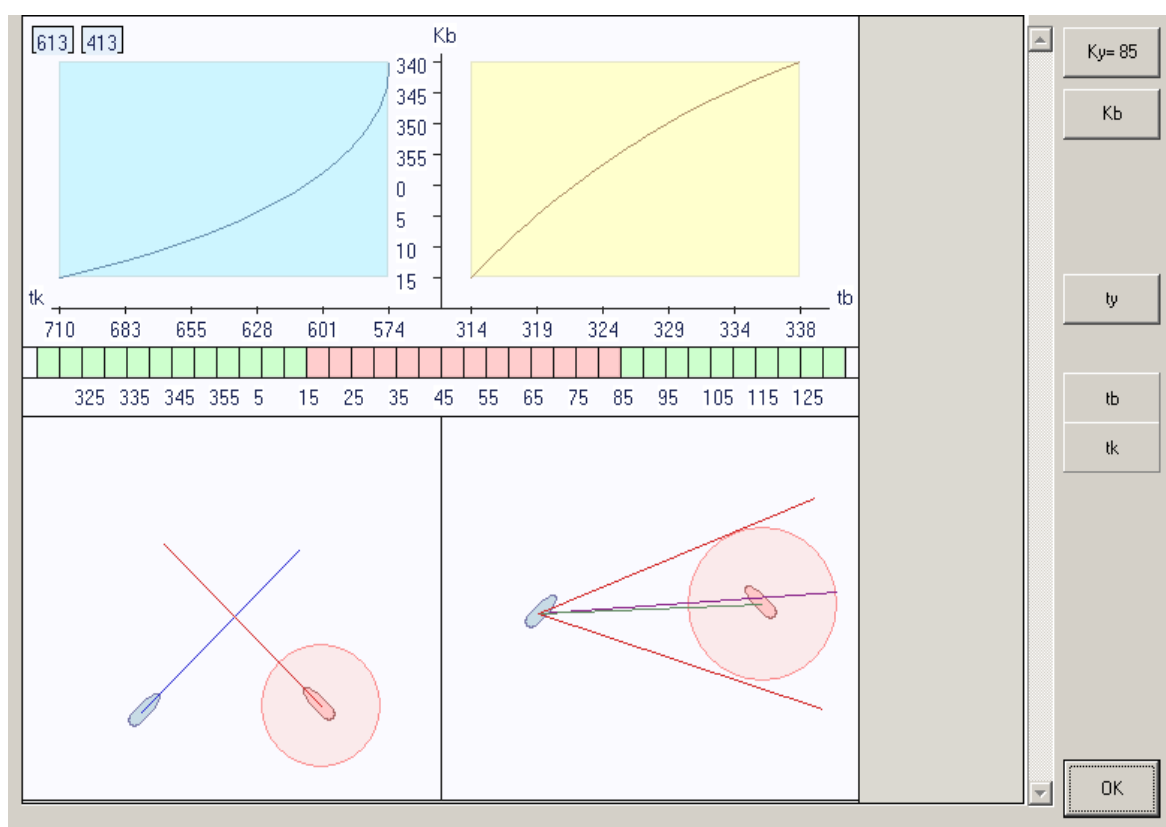


Рисунок 4.33 – Залежності моментів часу  $t_b$  і  $t_k$  від курсу виходу  $K_b$

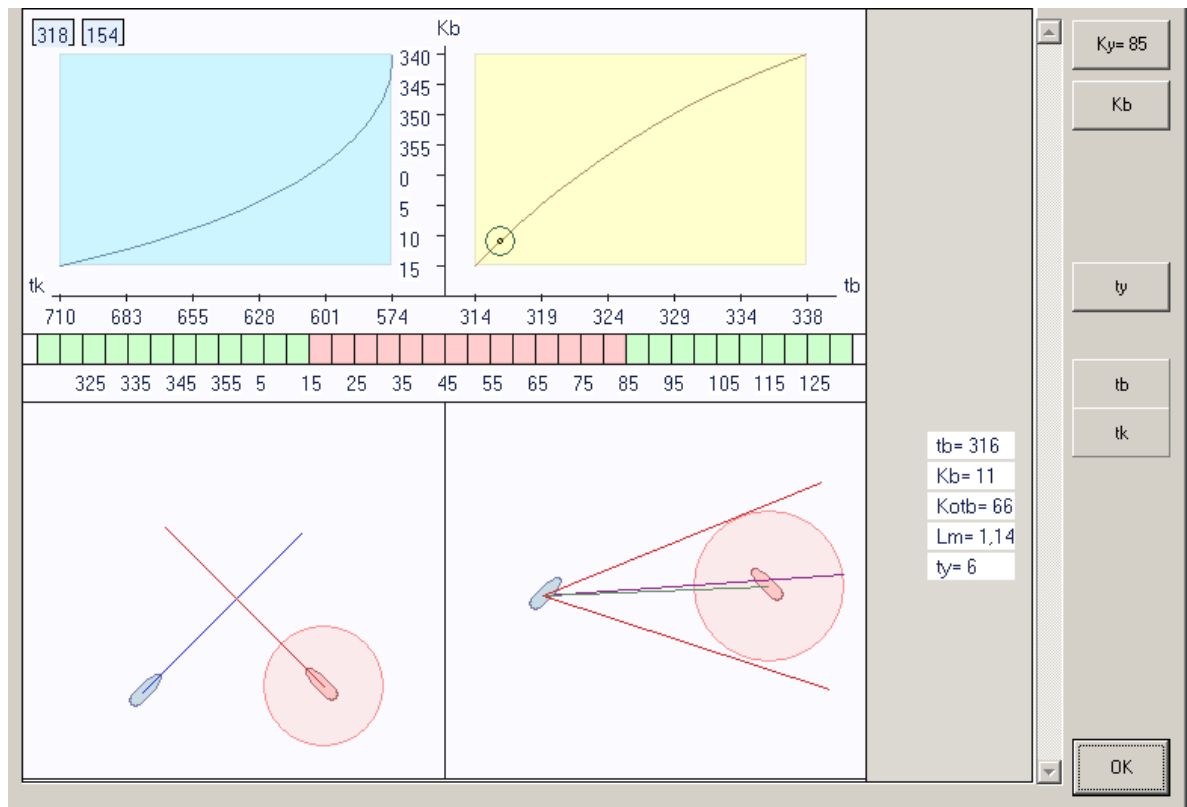


Рисунок 4.34 – Вибір точки кривої з параметрами  $t_b = 316$  с і  $K_b = 11^\circ$

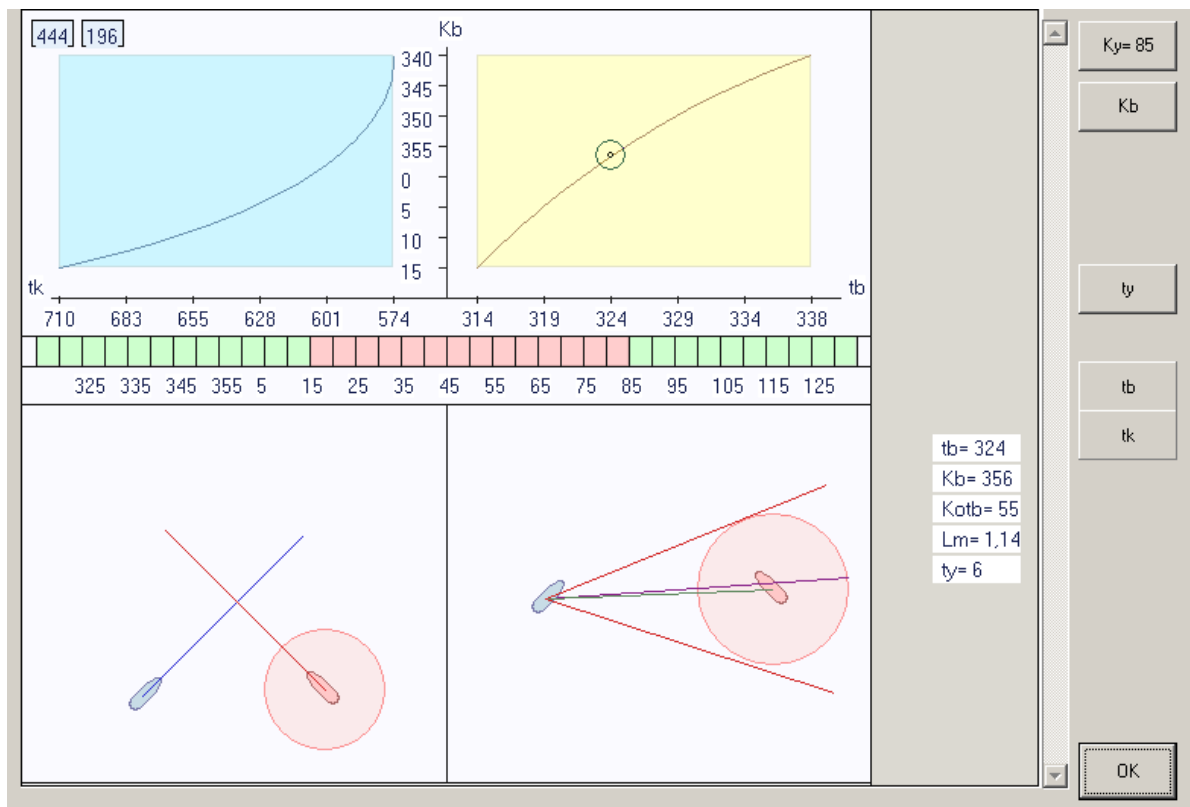


Рисунок 4.35– Точка кривої з параметрами  $t_b = 324$  с і  $K_b = 356^\circ$



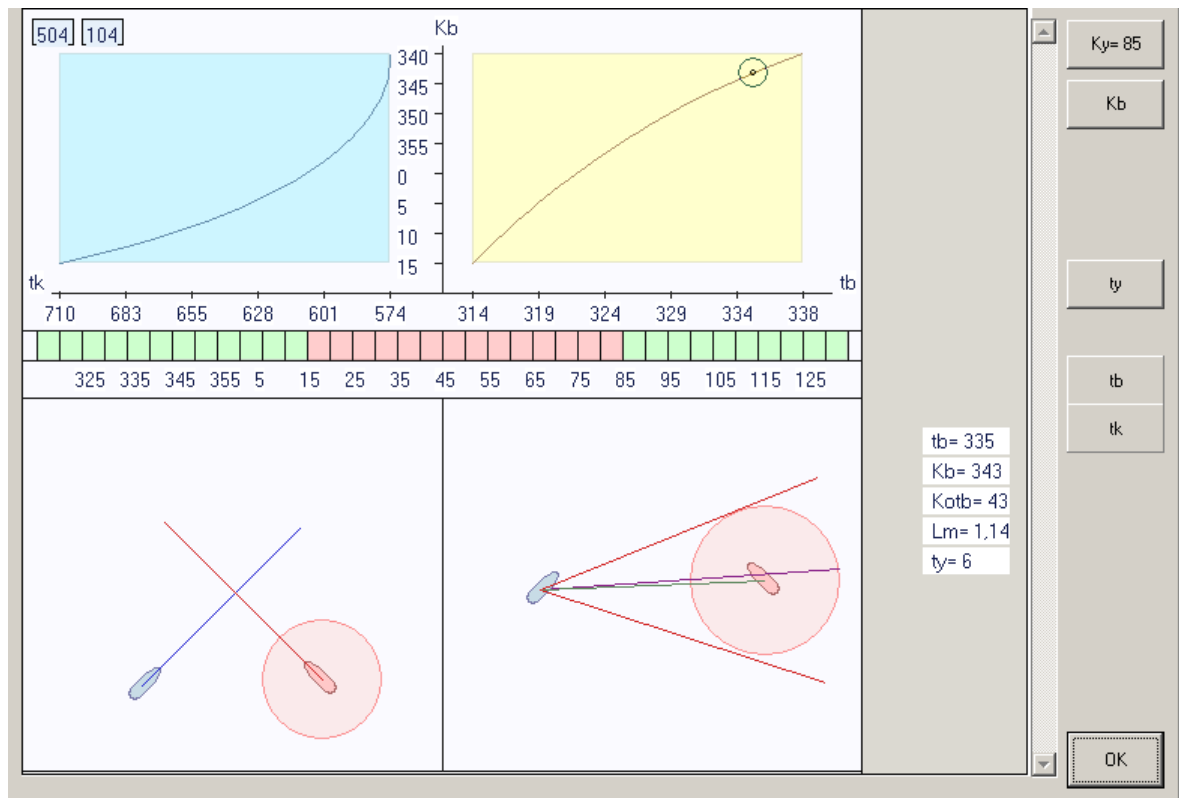


Рисунок 4.36 – Вибір точки кривої з параметрами  $t_b = 335$  с і  $K_b = 343^\circ$

Другий приклад, розглянутий для тієї ж ситуації небезпечного зближення, у разі, коли ухилення проводиться вліво з параметрами  $t_y = 5$  с і  $K_y = 14^\circ$ . Криві залежностей моментів часу  $t_b$  і  $t_k$  від курсу виходу  $K_b$  (рис. 4.37).

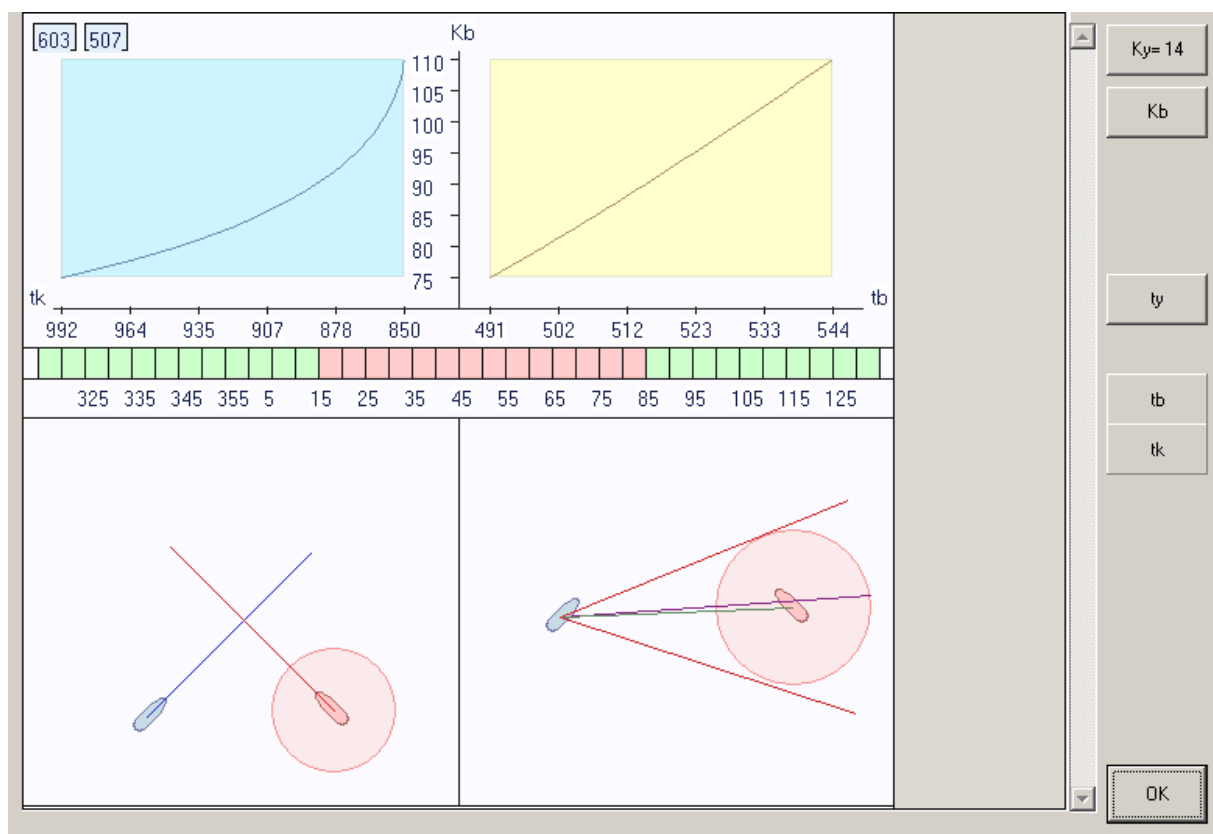


Рисунок 4.37 – Моменти часу  $t_b$  і  $t_k$ , як функції від курсу виходу  $K_b$

Тестування коректності функціональної кривої залежності під час ухилення судна вліво також вироблялося вибором її трьох крапок, (рис. 4.38 ÷ 4.40), розташованих на різних ділянках кривої. Для кожного положення точки програмою розраховувалася дистанція найкоротшого зближення, яка для всіх трьох вибраних крапок виявилася практично рівній гранично - допустимій дистанції зближення, що підтвердило коректність процедури розрахунку функціональної кривої.

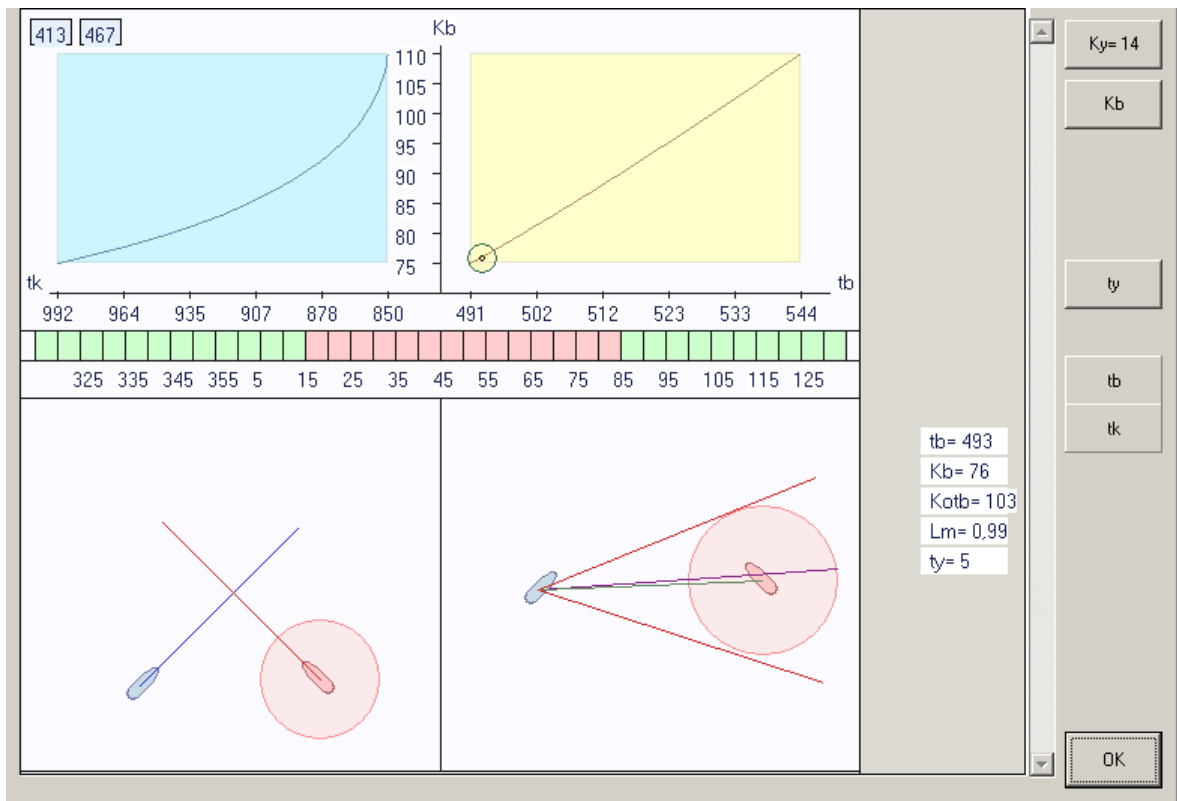


Рисунок 4.38 – Перевірка точки кривої з параметрами  $t_b = 493$  с і  $K_b = 76^\circ$

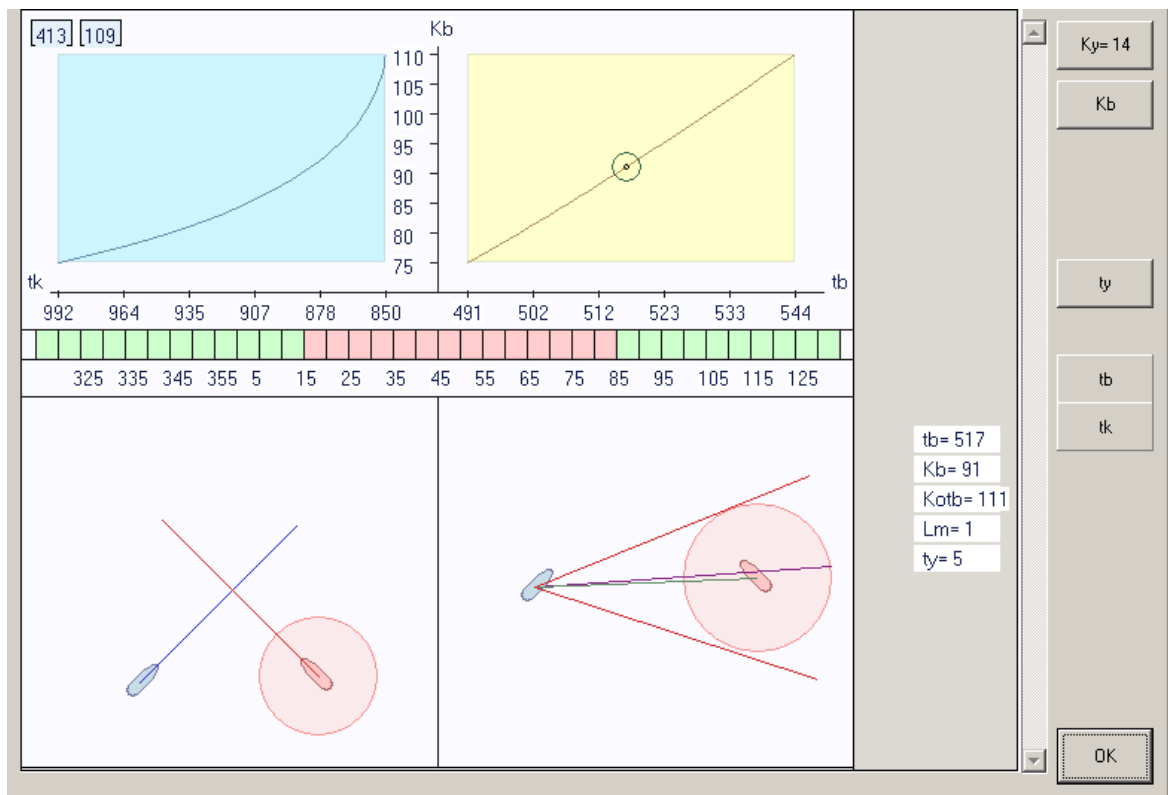


Рисунок 4.39 – Точка кривої з параметрами  $t_b = 517$  с і  $K_b = 91^\circ$

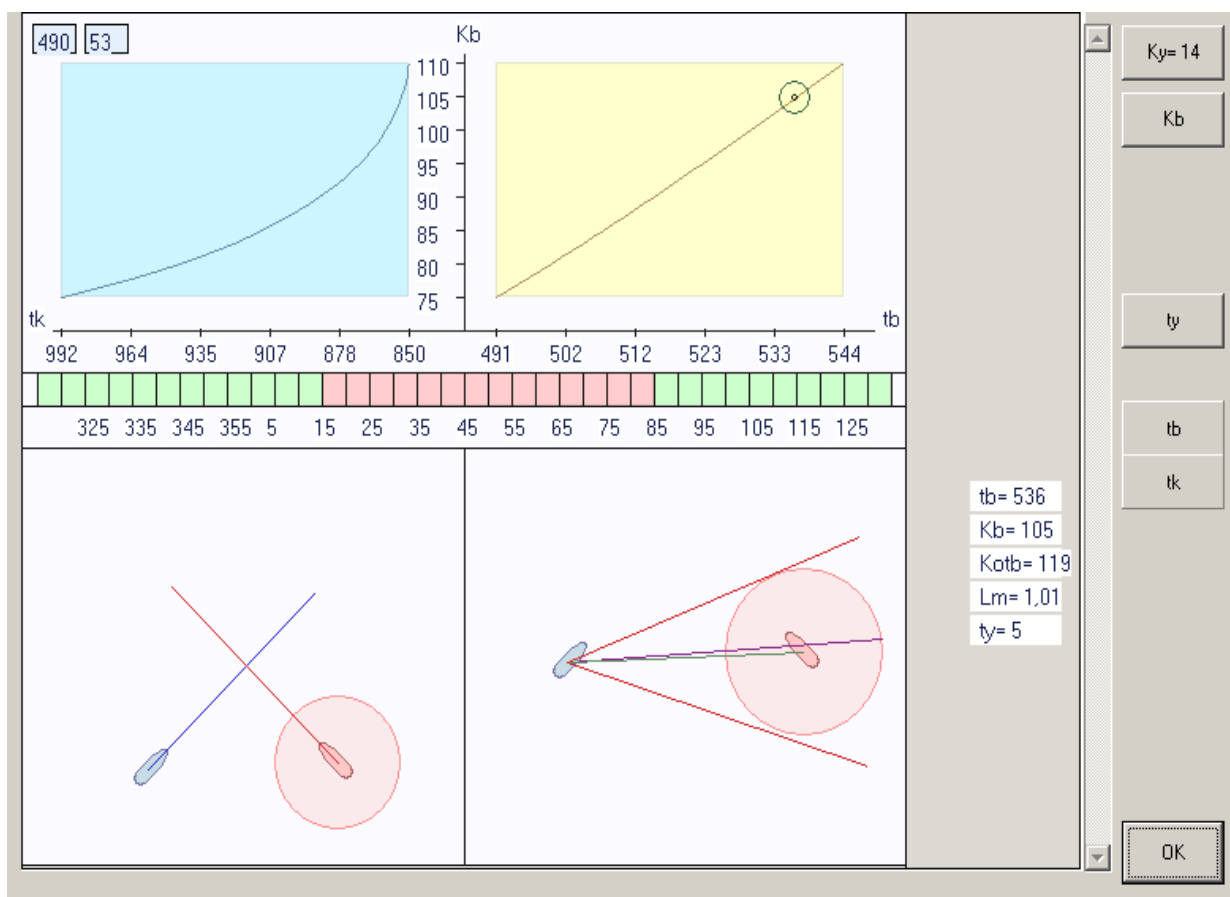


Рисунок 4.40 – Перевірка точки кривої з параметрами  $t_b = 536$  с і  $K_b = 105^\circ$

На рисунку 4.41 показаний вибір значень моментів часу  $t_b$  і  $t_k$  залежно від курсу виходу  $K_b$  під час ухилення судна управо. Так, для  $K_b = 10^\circ$  за допомогою кривих набулі значення моментів часу  $t_b = 316,5$  с і  $t_k = 655$  с, а для  $K_b = 0^\circ$  з того ж рисунку вибрані значення  $t_b = 322$  с і  $t_k = 609$  с.

Криві залежності  $t_b$  і  $t_k$  від курсу виходу  $K_b$  під час ухилення судна вліво (рис. 4.42). З рисунку виходить, коли  $K_b = 95^\circ$  значення  $t_b = 521$  с і  $t_k = 875$  с, а для курсу виходу  $K_b = 85^\circ$  значення  $t_b = 506$  с і  $t_k = 915$  с.

Отже, за допомогою розробленої процедури можна одержати моменти часу  $t_b$  і  $t_k$ , задаючись значенням курсу ухилення  $K_b$ , як під час ухилення курсу управо, так і у разі його ухилення вліво.

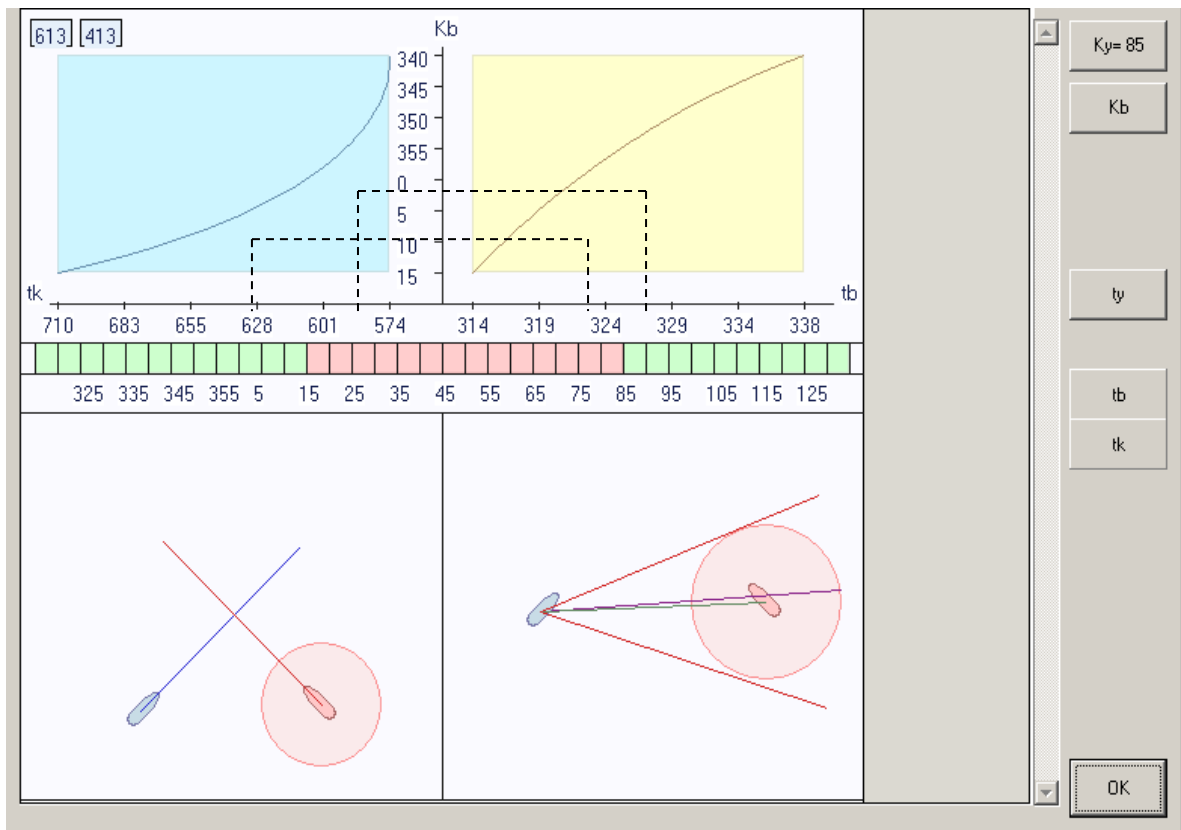


Рисунок 4.41 – Вибір моментів часу  $t_b$  і  $t_k$  під час ухилення судна управо

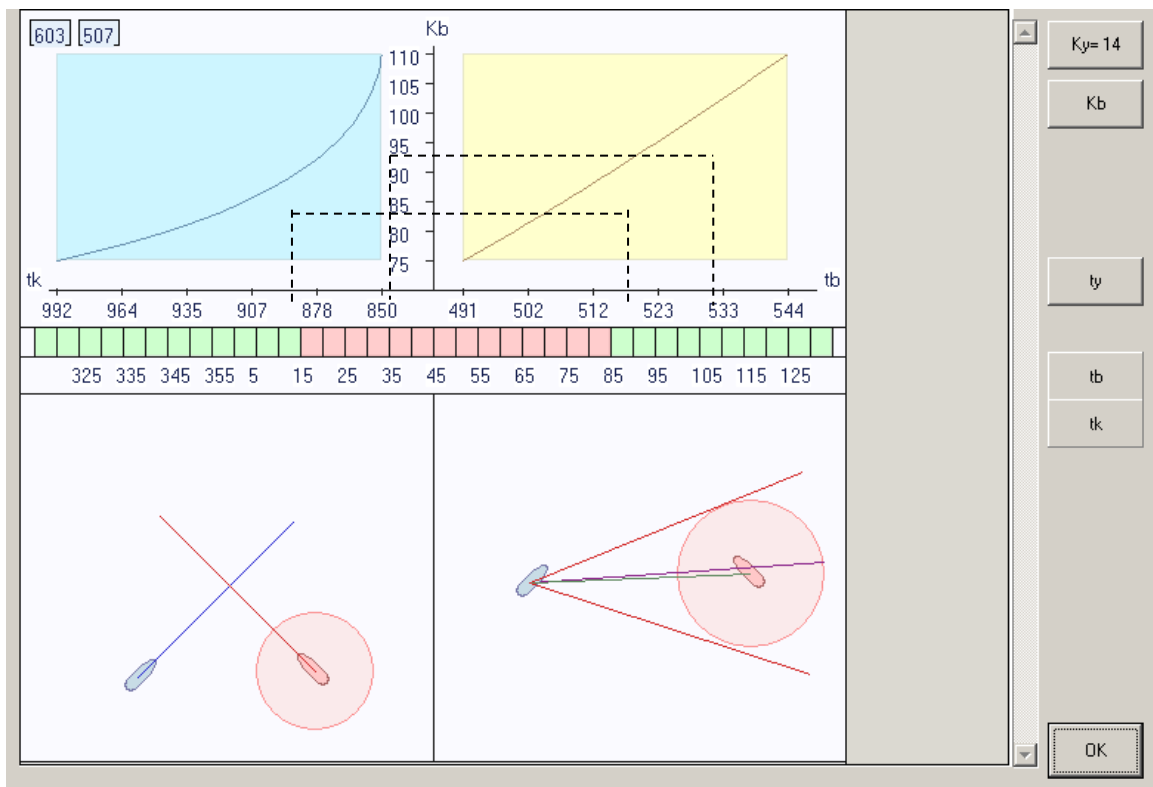


Рисунок 4.42 – Вибір моментів часу  $t_b$  і  $t_k$  під час ухилення судна вліво

### 4.3 Висновки за четвертим розділом

В четвертому розділі запропоновано аналітичні вирази і алгоритм для розробки процедур інформаційної системи, необхідних під час оцінки ситуації зближення і оптимізації маневру розходження.

Одержано комп'ютерні процедури формування області неприпустимих значень параметрів ухилення, за допомогою якої можна вибрати оптимальні значення часу  $t_y$  і курсу  $K_y$  ухилення судна під час його небезпечного зближення з цілю.

В розділі також запропоновано і розглянуто комп'ютерні процедури формування області  $Q_{K, t_b}$  допустимих значень параметрів  $K_y$  і  $t_y$ , які забезпечують безпечне розходження судна з цілю. Розглянуті процедури передбачають розрахунок меж областей для випадку переваги швидкості судна над швидкістю цілі, так і інакшому випадку.

На закінчення розділу розроблена комп'ютерна процедура, яка дозволяє визначити залежність моментів часу  $t_b$  і  $t_k$  щодо вибраного курсу  $K_b$  з урахуванням сторони ухилення судна.

## РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДУ ОПЕРАТИВНОГО ВИБОРУ МАНЕВРУ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН

### 5.1 Короткий опис програми імітаційного моделювання

Програма імітаційного моделювання складається з трьох модулів:

- вибору початкової ситуації небезпечного зближення і формування для неї області неприпустимих значень параметрів ухилення  $Q_{K, ty}$  і області  $Q_{K, tb}$  допустимих значень параметрів  $K_y$  і  $t_b$ ;
- визначення оптимальних параметрів розходження судна з відображенням на електронній карті істинної і відносної траєкторій розходження судна;
- імітаційного моделювання процесу розходження судна.

Вибір початкової ситуації небезпечного зближення здійснюється клавішею "Ситуації" (рис. 5.1).

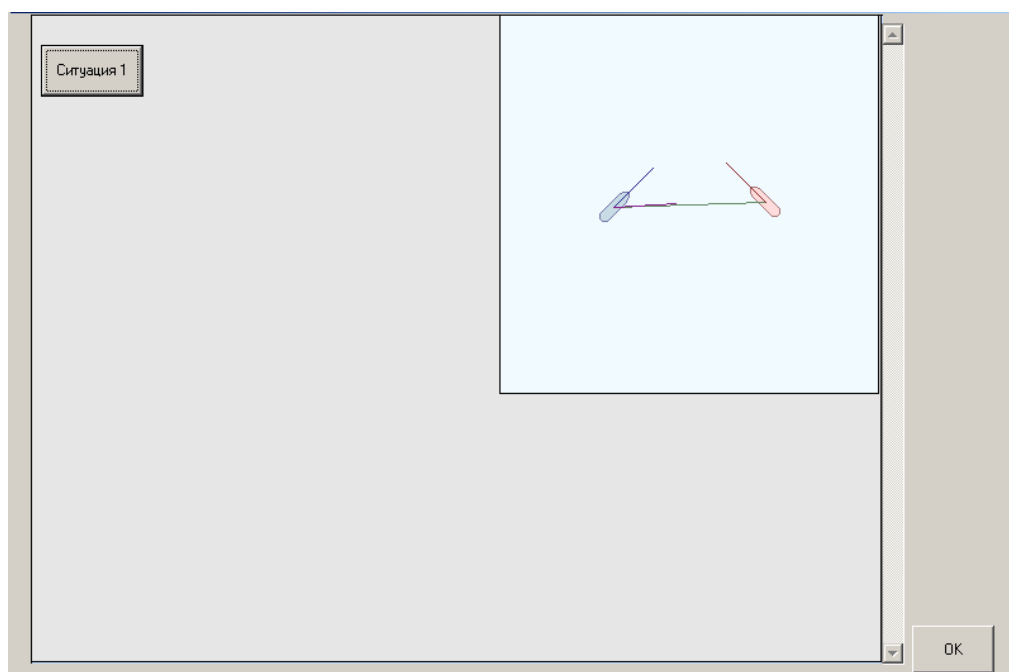


Рисунок 5.1 – Вибір початкової ситуації

Клавішею "ОК" виводиться графічне зображення ситуації зближення і її параметри, тобто параметри руху суден і початкова відносна позиція, показані на рисунку 5.2.

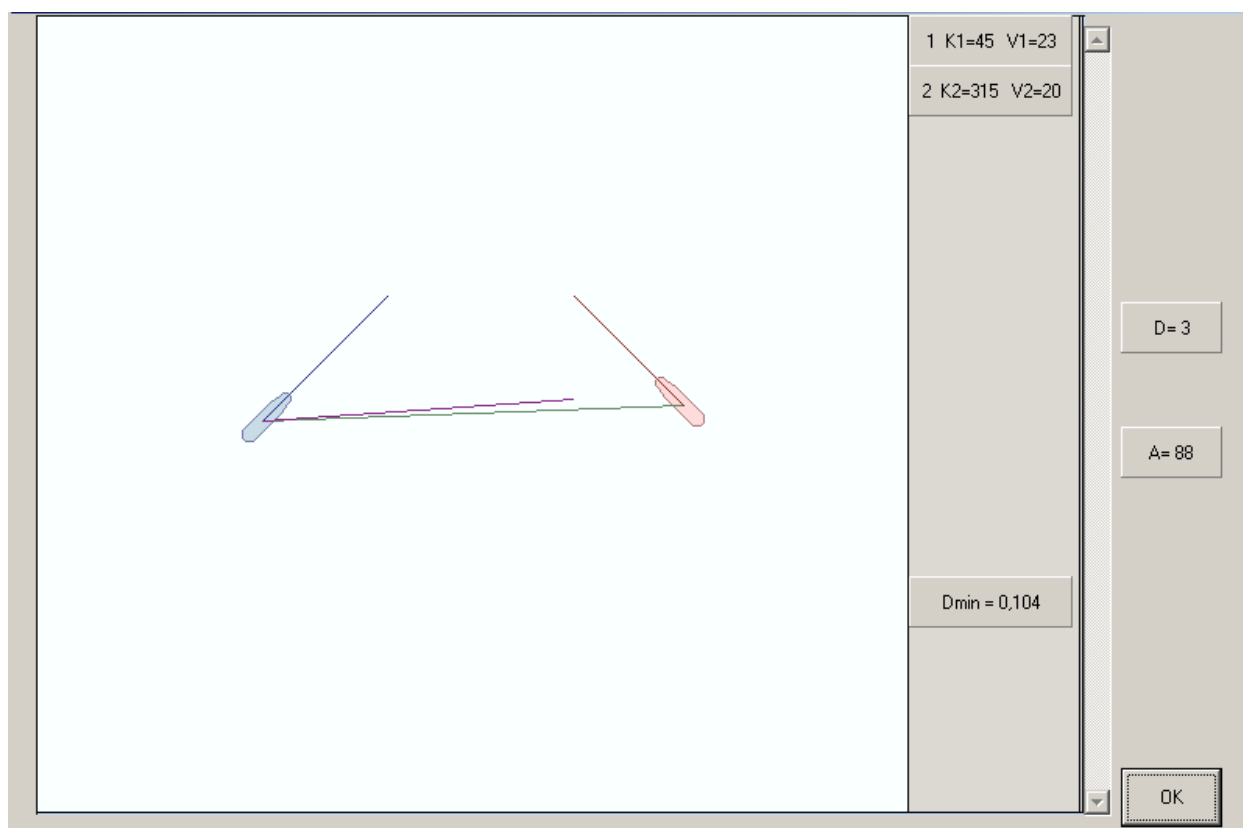


Рисунок 5.2 – Параметри ситуації зближення

За допомогою повторного використання клавіші "ОК" на екран монітору виводяться області  $Q_{K, ty}$  і  $Q_{K, tb}$ , які мають загальну вісь абсцис курсів ухилення судна  $K_y$  (рис. 5.3). На верхній області  $Q_{K, ty}$  за віссю ординат нанесені значення часу початку ухилення судна  $t_y$ . На осі ординат нижньої області  $Q_{K, tb}$  нанесені значення часу початку часу повороту  $t_b$  на ділянку виходу, зважаючи на те, що з правого боку вказані значення під час ухилення судна управо, а з лівого боку - під час ухилення вліво. За допомогою клавіші "Ухилення" вибирається сторона ухилення судна. Після вибору сторони ухилення (рис. 5.4), для прикладу управо, з'являється клавіша "ty" для вибору значення часу початку ухилення.



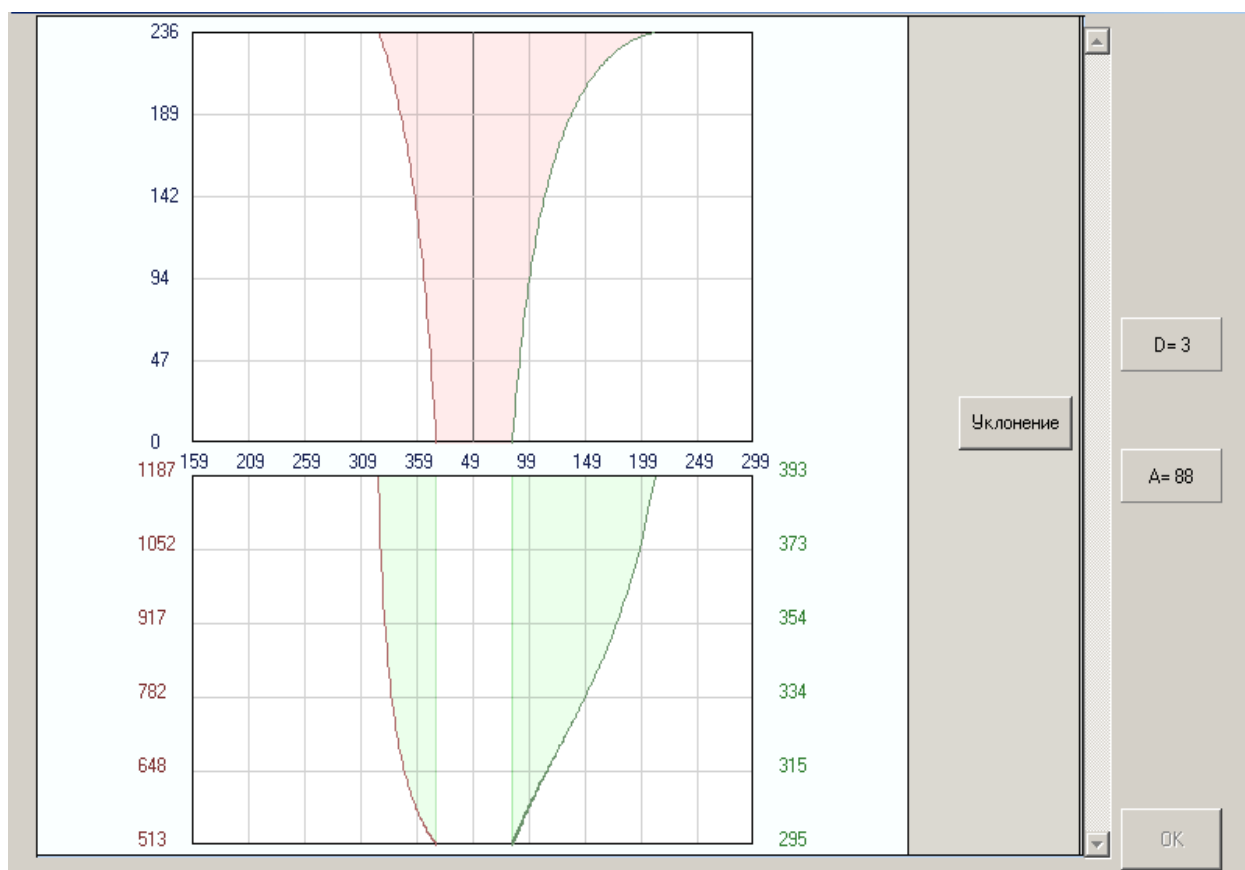


Рисунок – 5.3. Области  $Q_{K,ty}$  і  $Q_{K,tb}$

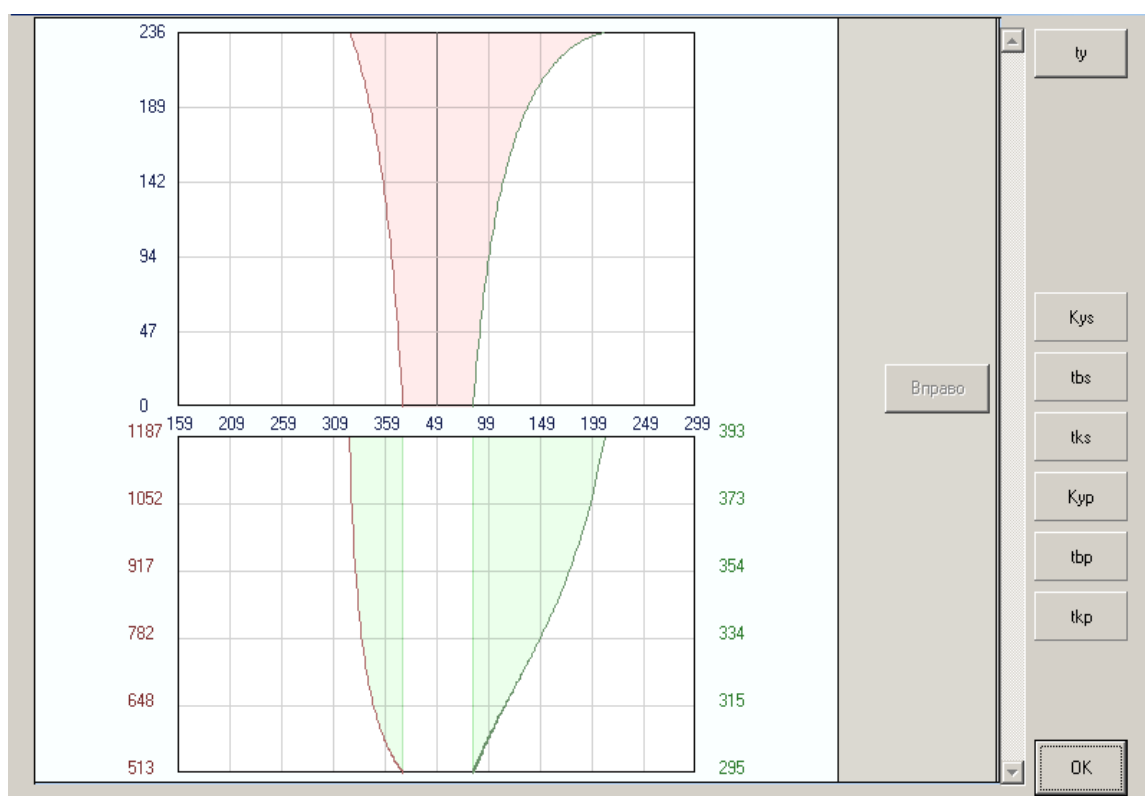


Рисунок 5.4 – Введення сторони ухилення

Час ухилення вводиться за допомогою лінійки прокрутки (ScrollBar), значимо, що значення часу ухилення відображається горизонтальною лінією на верхній області  $Q_{K,ty}$  і виводиться на відповідній клавіші (рис. 5.5). Значення курсу ухилення відображається вертикальною лінією на обох областях і виводиться на інформаційне табло. У прикладі, що наводиться,  $t_y = 120$  с і  $K_y = 106^\circ$ . Одночасно із зміною  $t_y$  на нижній області горизонтальною лінією відображається значення  $t_b$  і його значення виводиться на панель, у даному прикладі  $t_b = 310$  с. Програмою також розраховується значення часу  $t_k$  досягнення судном програмної траєкторії руху і виводиться на панель (для прикладу  $t_k = 640$  с).

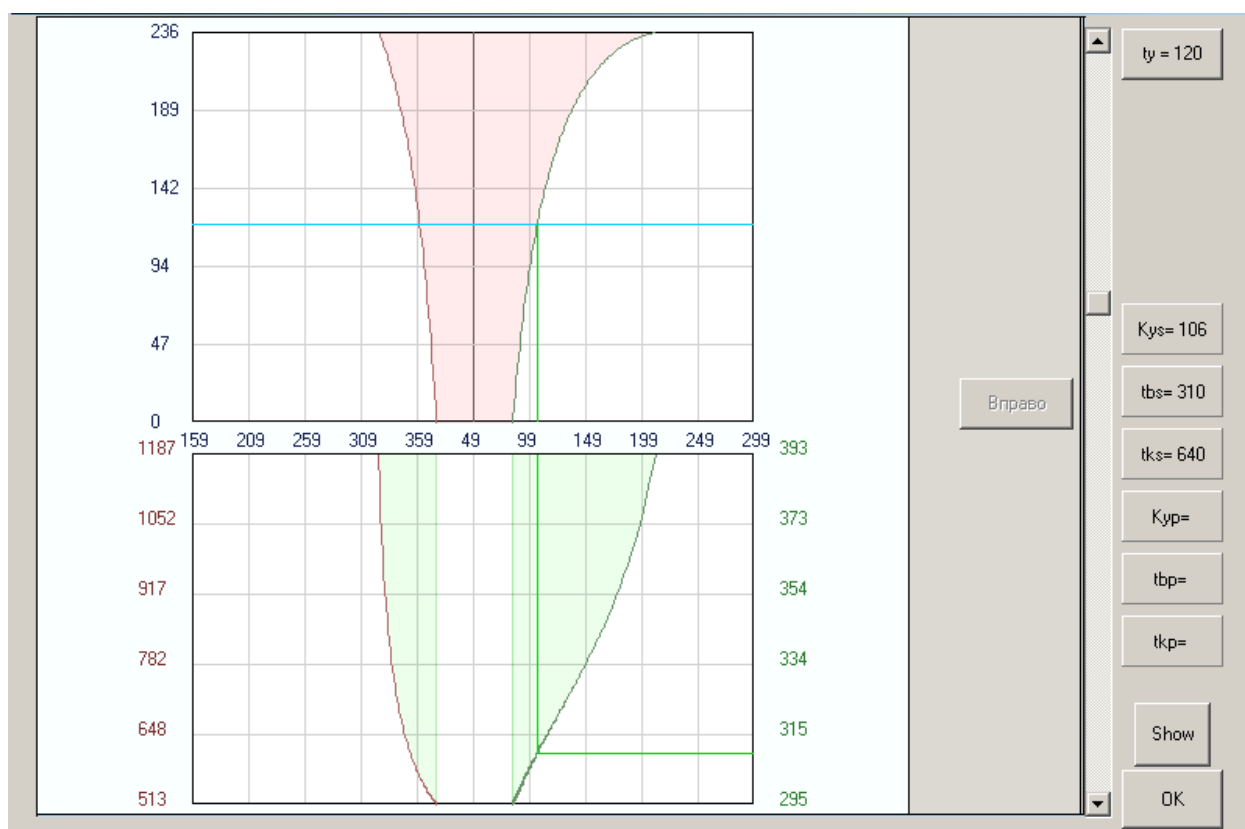


Рисунок 5.5 – Вибір параметрів маневру розходження

При використанні клавіші "Show" на електронній карті відображаються істинна і відносна траєкторії розходження (рис. 5.6).

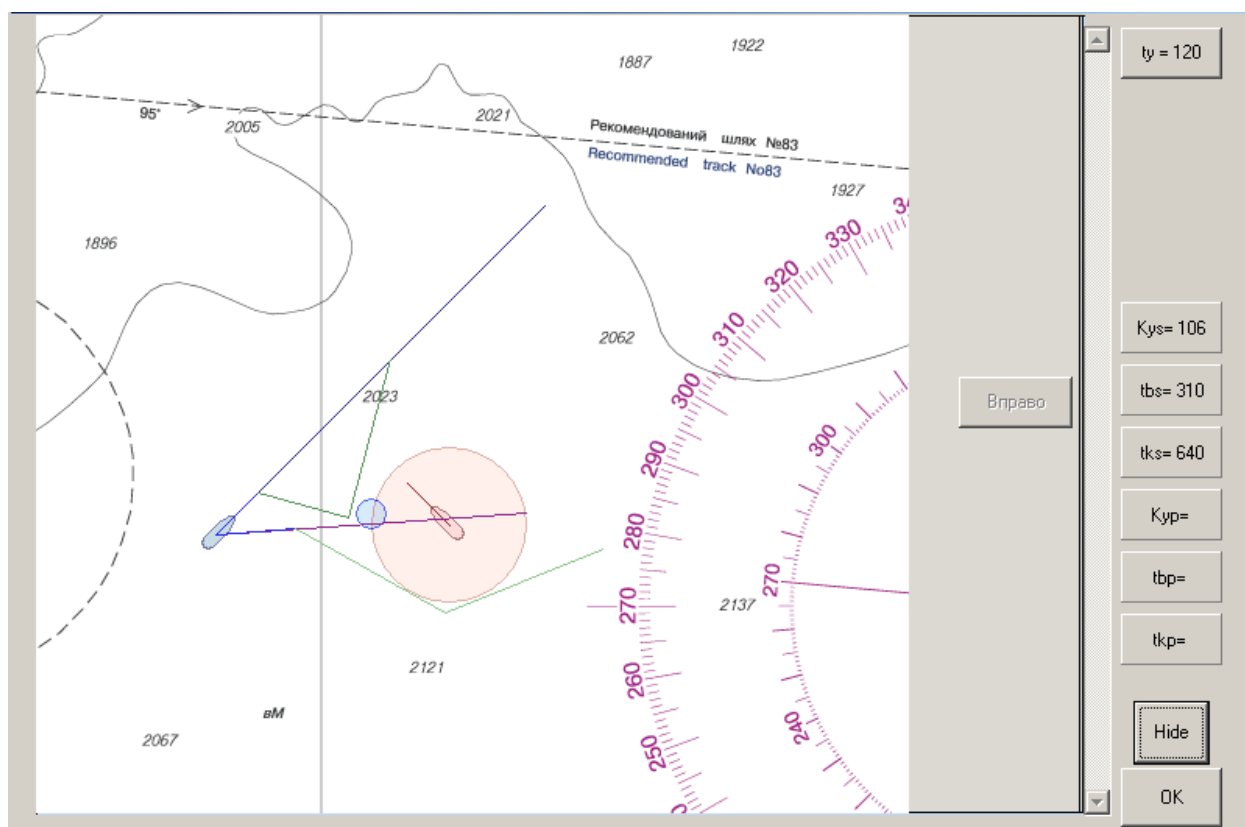


Рисунок 5.6 – Істинна і відносна траєкторії розходження

У разі потреби можна змінити маневр розходження, використовуючи клавішу "Hide". Оскільки істинна траєкторія проходить поряд з навігаційною перешкодою, то значення  $t_y$  збільшене до 180 с, чим досягнута безпечна траєкторія розходження, про що свідчить рисунок 5.7. Після використання клавіші "Маневр" (рис. 5.8), здійснюється індикація маневру розходження. При цьому програмою прооводиться розрахунок початку і кінця моментів часу з урахуванням динамічної моделі обертального руху судна, а набуті значення приводяться на інформаційних панелях. Надалі можлива перевірка коректності одержаного маневру розходження його імітаційним моделюванням за допомогою клавіші "TIMER".

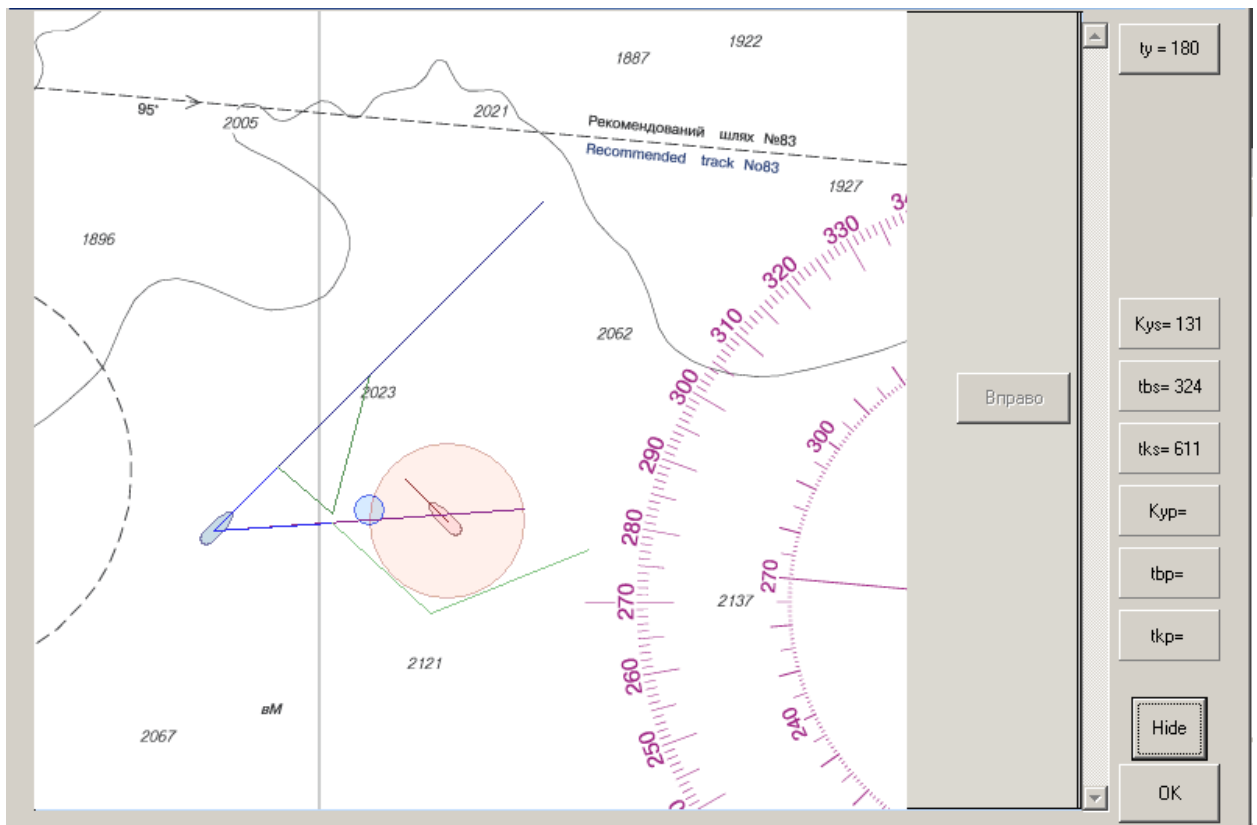


Рисунок 5.7 – Уточнення маневру розходження

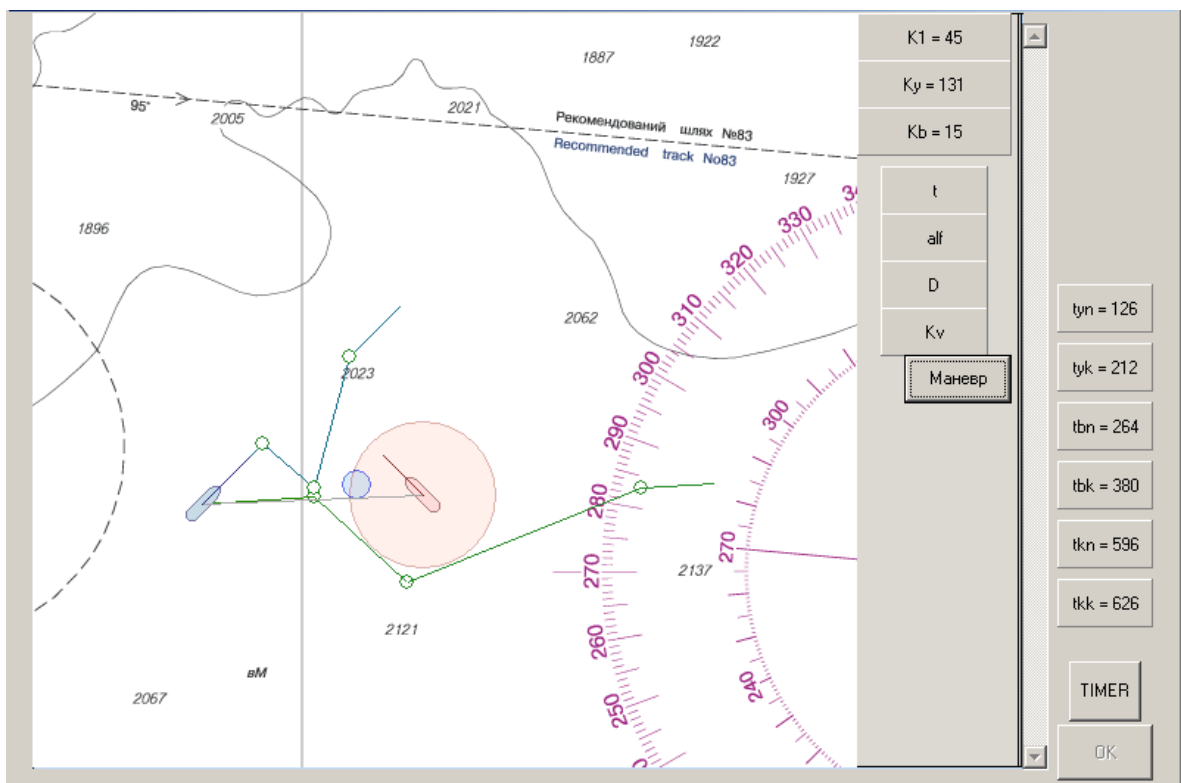


Рисунок 5.8 – Індикація маневру розходження

## 5.2 Вибір маневру розходження у відкритому морі

При виникненні ситуації небезпечного зближення у відкритому морі немає необхідності урахування навігаційних перешкод. Тому розглянемо відповідну ситуацію зближення, під номером 4 в імітаційній програмі. На рисунку 5.9 показане графічне зображення ситуації і її параметри.

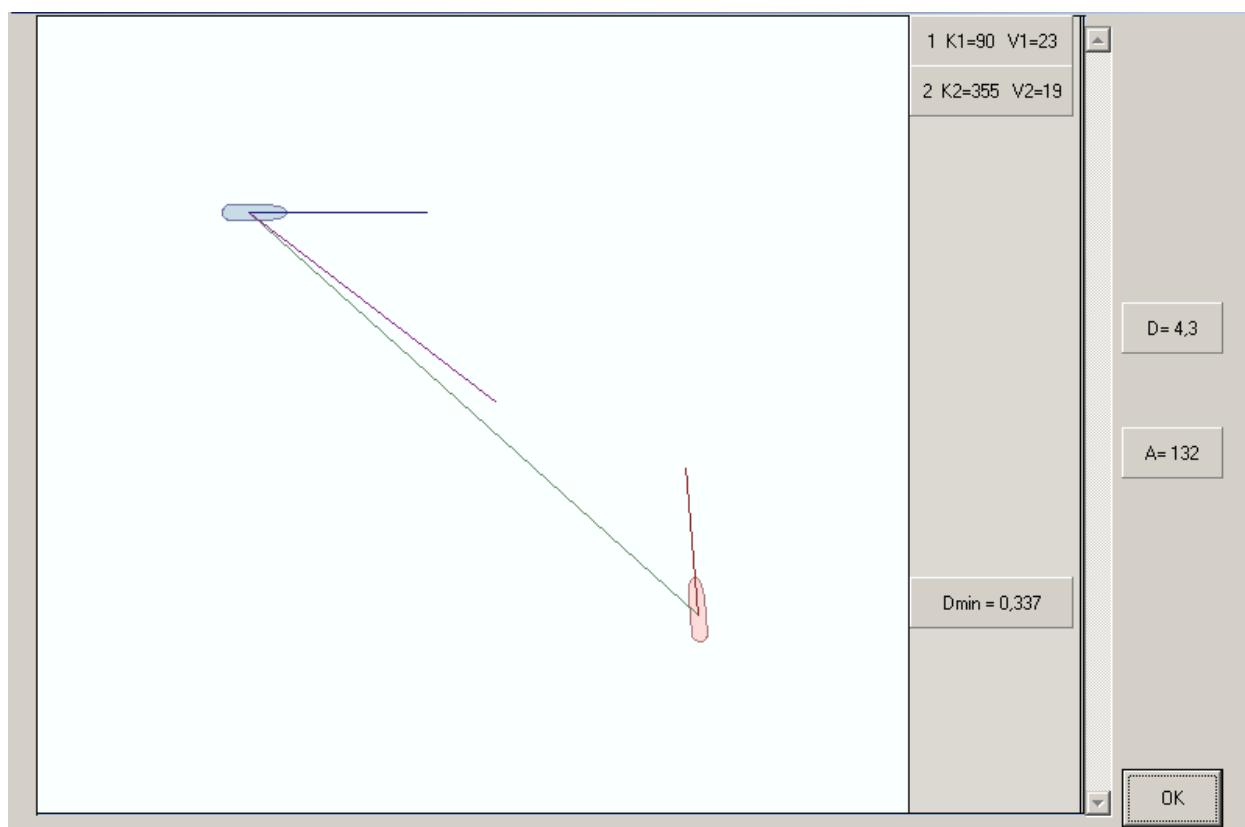


Рисунок 5.9 – Четверта ситуація небезпечного зближення

Області  $Q_{K, ty}$  і  $Q_{K, tb}$  четвертої ситуації небезпечного зближення і вибір сторони ухилення маневру розходження представлені на рисунку 5.10. Для маневру розходження ухиленням управо на рисунку 5.11 показане введення часу ухилення, рівного 60 с, а також відповідні йому параметри маневру розходження, враховуючи відомий курс виходу, який однозначно залежить від курсу ухилення.

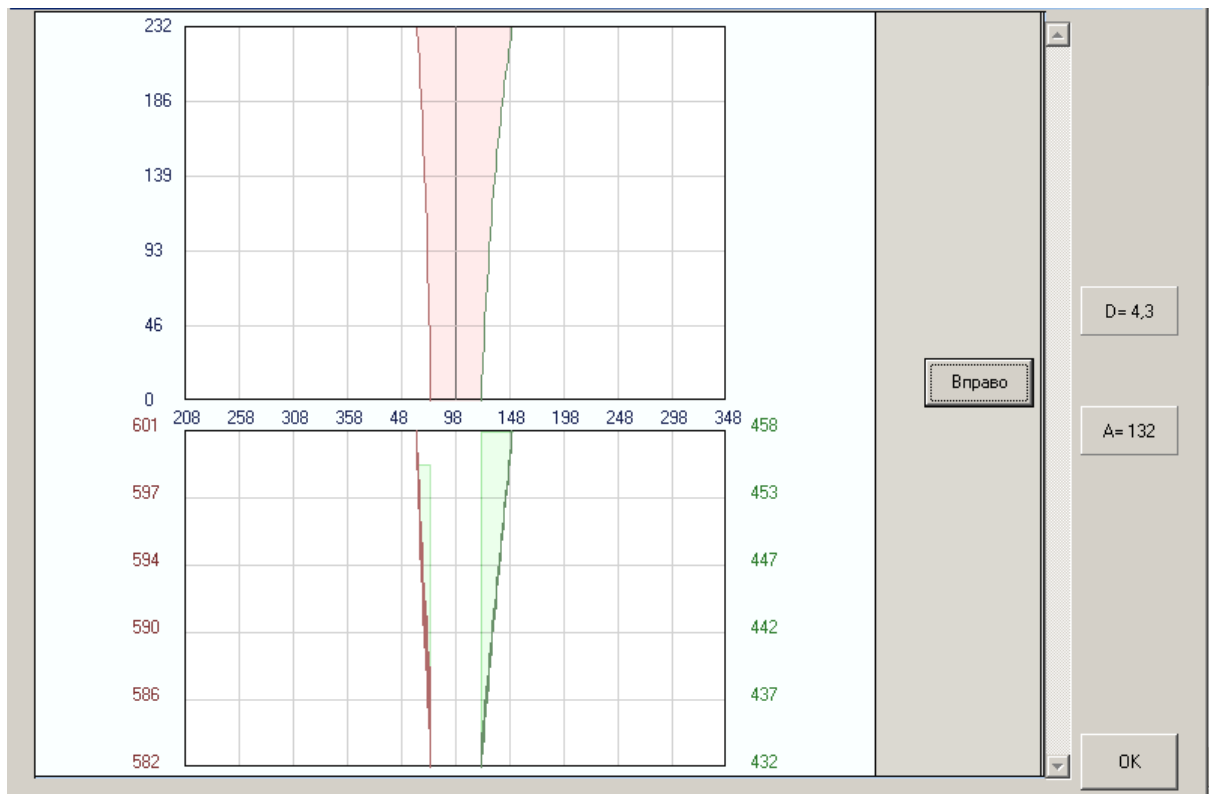


Рисунок 5.10 – Области  $Q_{K, ty}$  і  $Q_{K, tb}$  четвертої ситуації небезпечного зближення

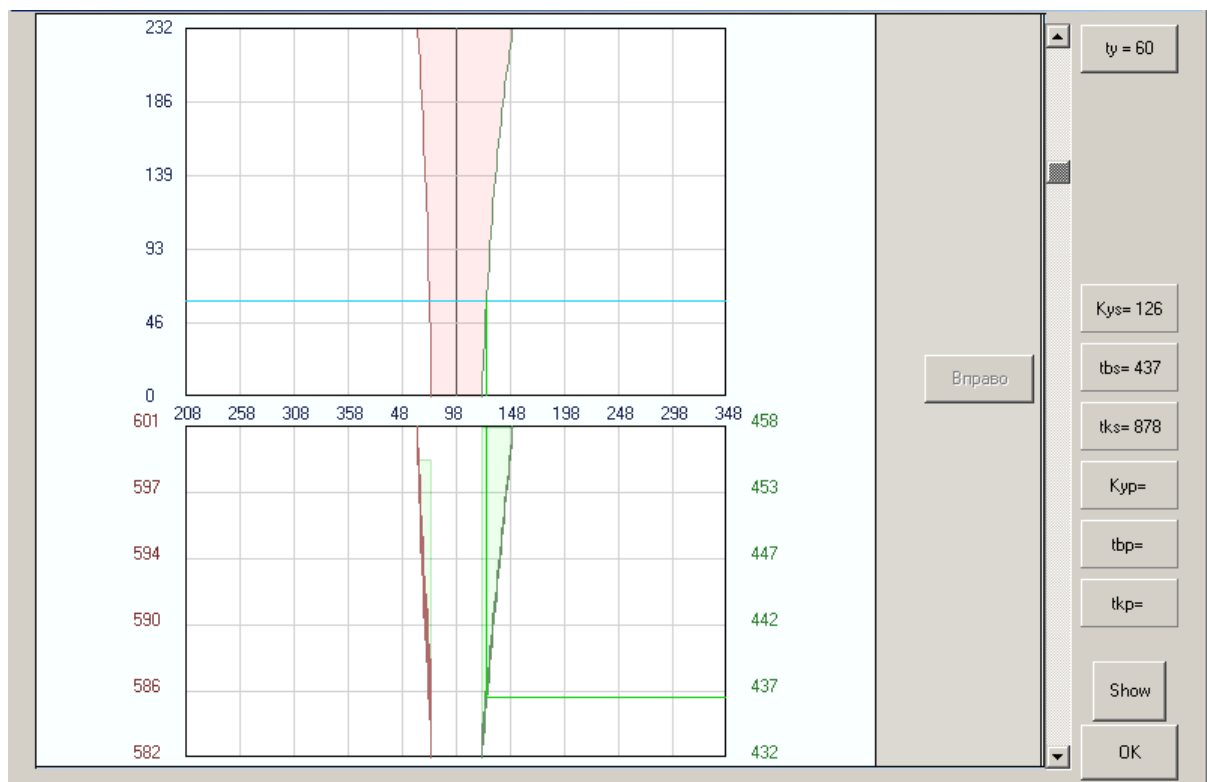


Рисунок – 5.11. Вибір маневру розходження ухиленням управо

На рисунку 5.12 показані істинна і відносна траєкторії розходження судна, а також відносні положення судна і цілі в початковий момент часу.

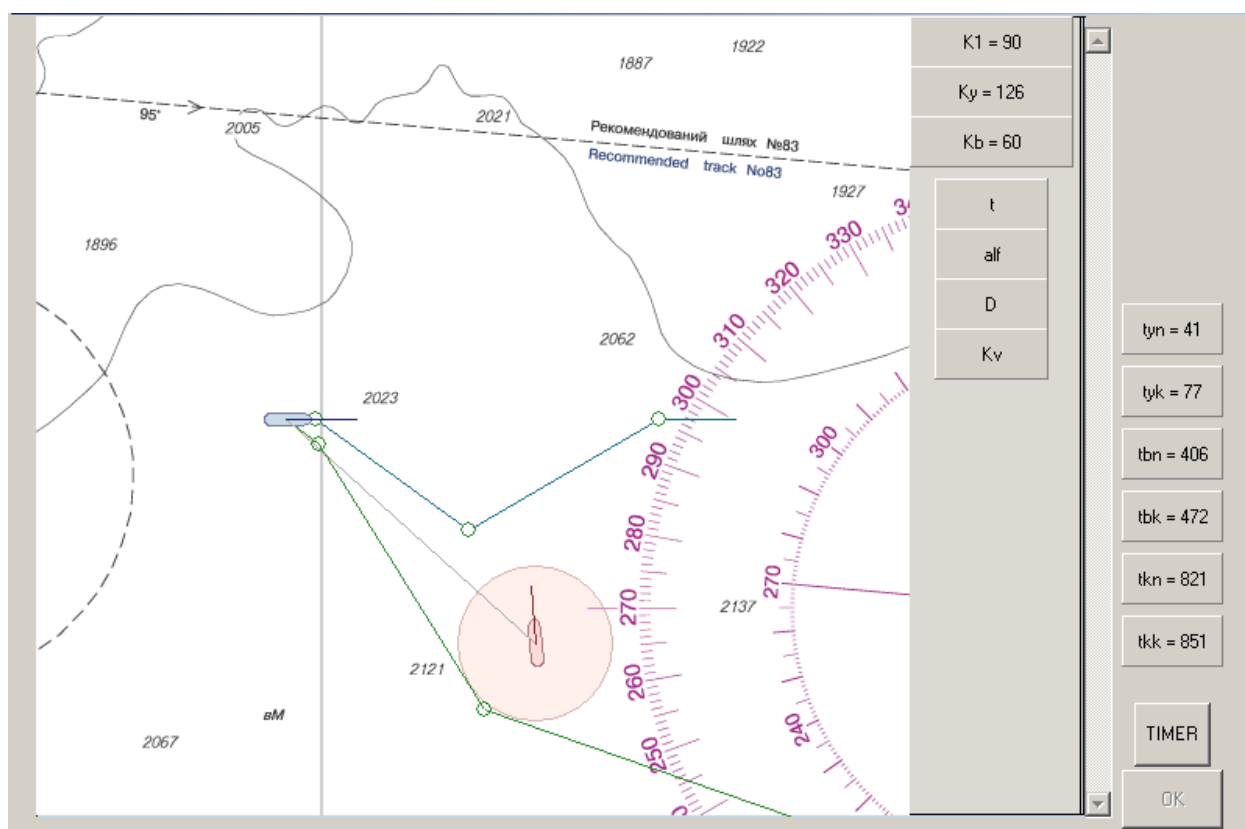


Рис. 5.12. Істинна і відносні траєкторії розходження

За допомогою клавіші "TIMER" здійснюється імітаційне моделювання процесу розходження. Початковий момент процесу розходження суден у момент часу  $t=1$  с показано на рисунку 5.13, а на рисунку 5.14 представлено процес розходження у момент часу початку ухилення.

Процес розходження суден у момент часу завершення ухилення відображений на рисунку 5.15, а момент часу початку виходу судна (рис. 5.16). Завершення виходу у момент часу  $t=476$  (рис. 5.17), на рисунку 5.18 показаний процес розходження у момент часу повернення судна на програмну траєкторію руху. З приведених рисунків, що відображають процес розходження, видно, що дистанція найкоротшого зближення рівна гранично - допустимій дистанції.

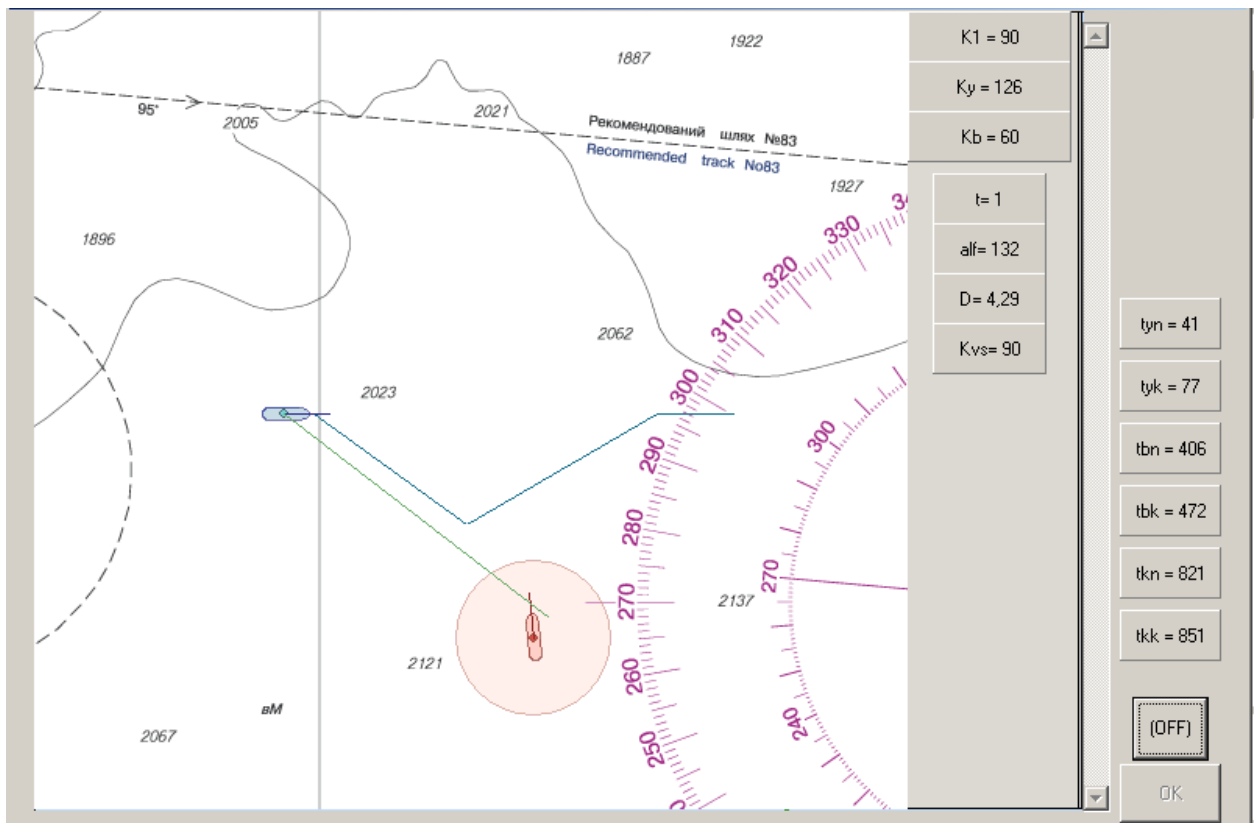


Рисунок 5.13 – Початковий момент процесу розходження

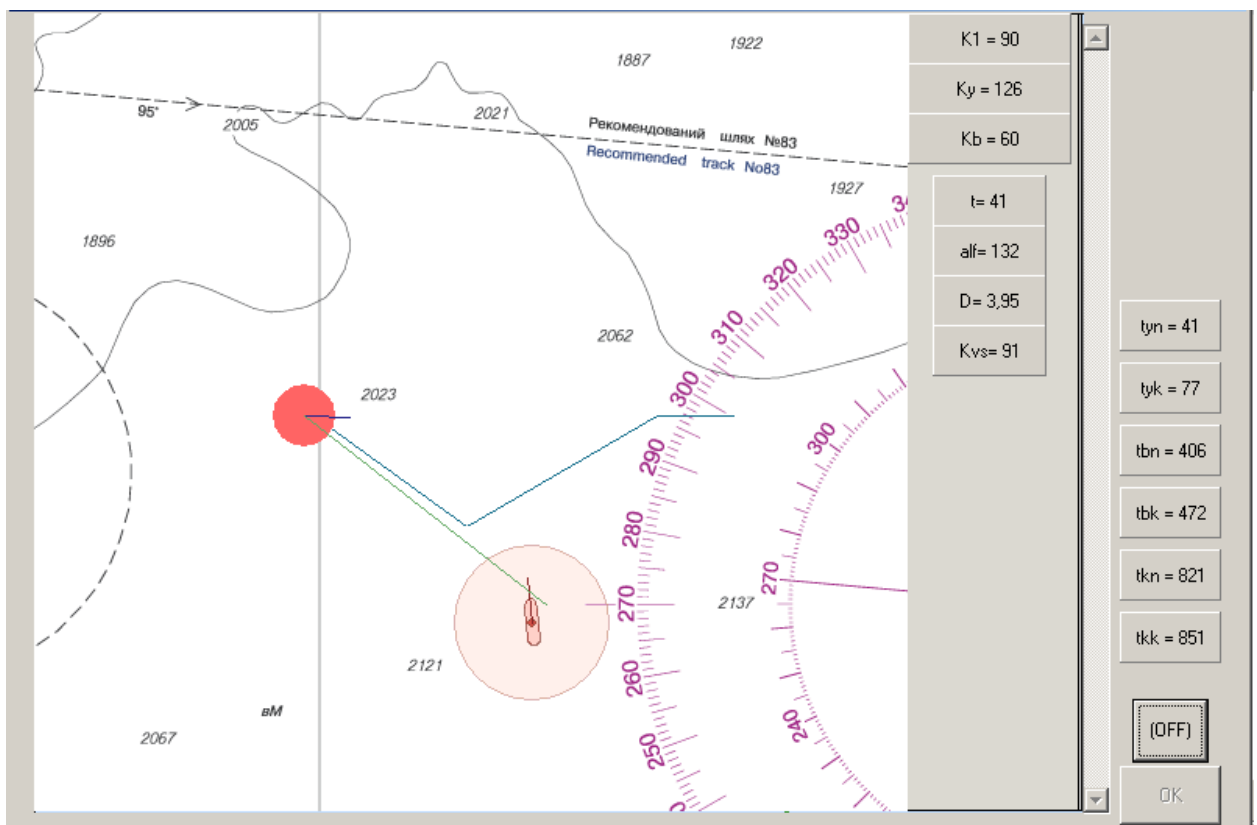


Рисунок 5.14 – Момент часу початку ухилення



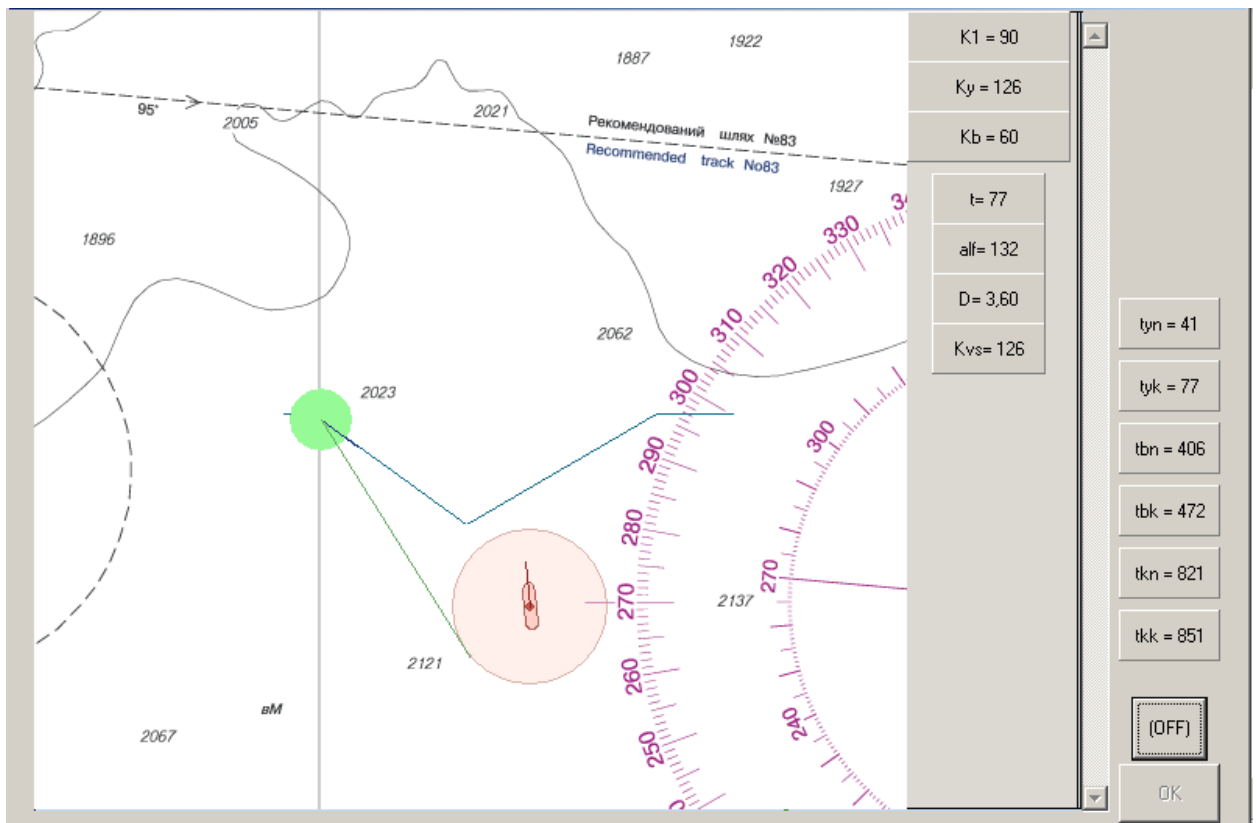


Рисунок 5.15 – Момент часу завершення ухилення

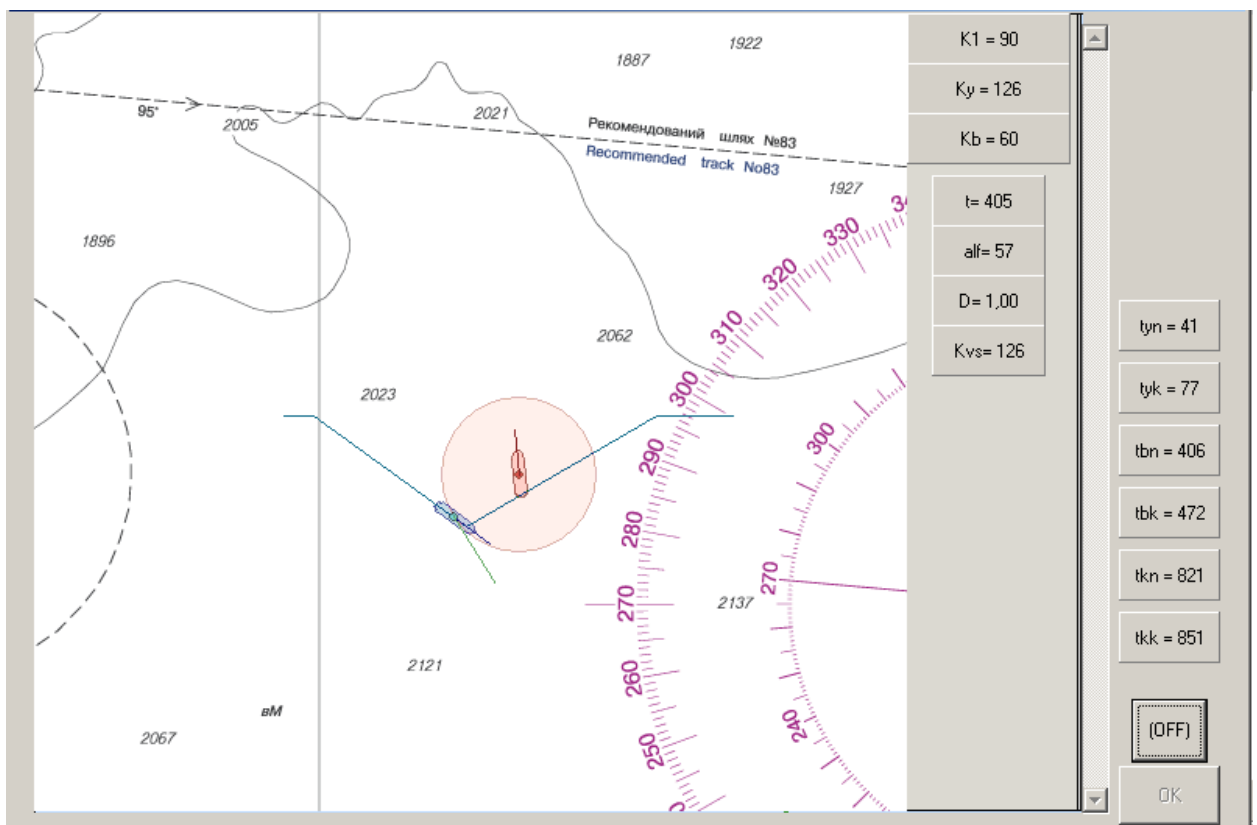


Рисунок 5.16 – Момент часу початку виходу

Рисунок 5.17 – Момент часу закінчення виходу

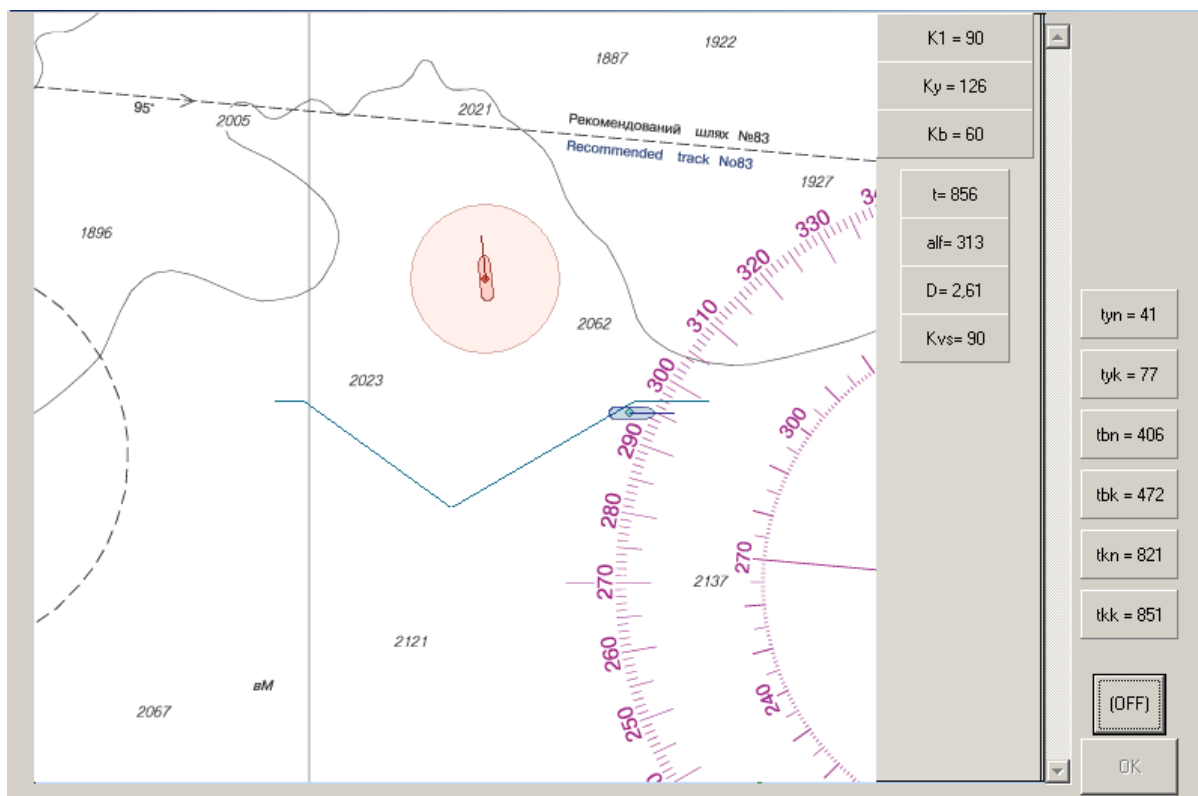


Рисунок 5.18 – Повернення судна на програмну траєкторію руху

Розглянуто маневр розходження для даної ситуації ухиленням вліво, зважаючи на те, що на рисунку 5.19 показаний вибір параметрів маневру розходження для моменту часу ухилення  $t_y = 60$  с. При цьому використовується ліва межа областей  $Q_{K,ty}$  і  $Q_{K,tb}$ , як і шкала області  $Q_{K,tb}$ . На рисунку 5.20 приведено відображення істинної і відносної траєкторій розходження під час ухилення судна вліво.

Імітаційне моделювання маневру розходження відображене на рисунках 5.21 – 5.23. Так на рисунку 5.21 показано процес розходження у момент часу завершення повороту ухилення судна на ділянку ухилення від небезпечної цілі. Поворот судна на ділянку виходу маневру розходження для повернення на програмну траєкторію руху (рис. 5.22).

На рисунку 5.23 показаний поворот судна на програмну траєкторію руху після завершення маневру розходження ухиленням вліво.

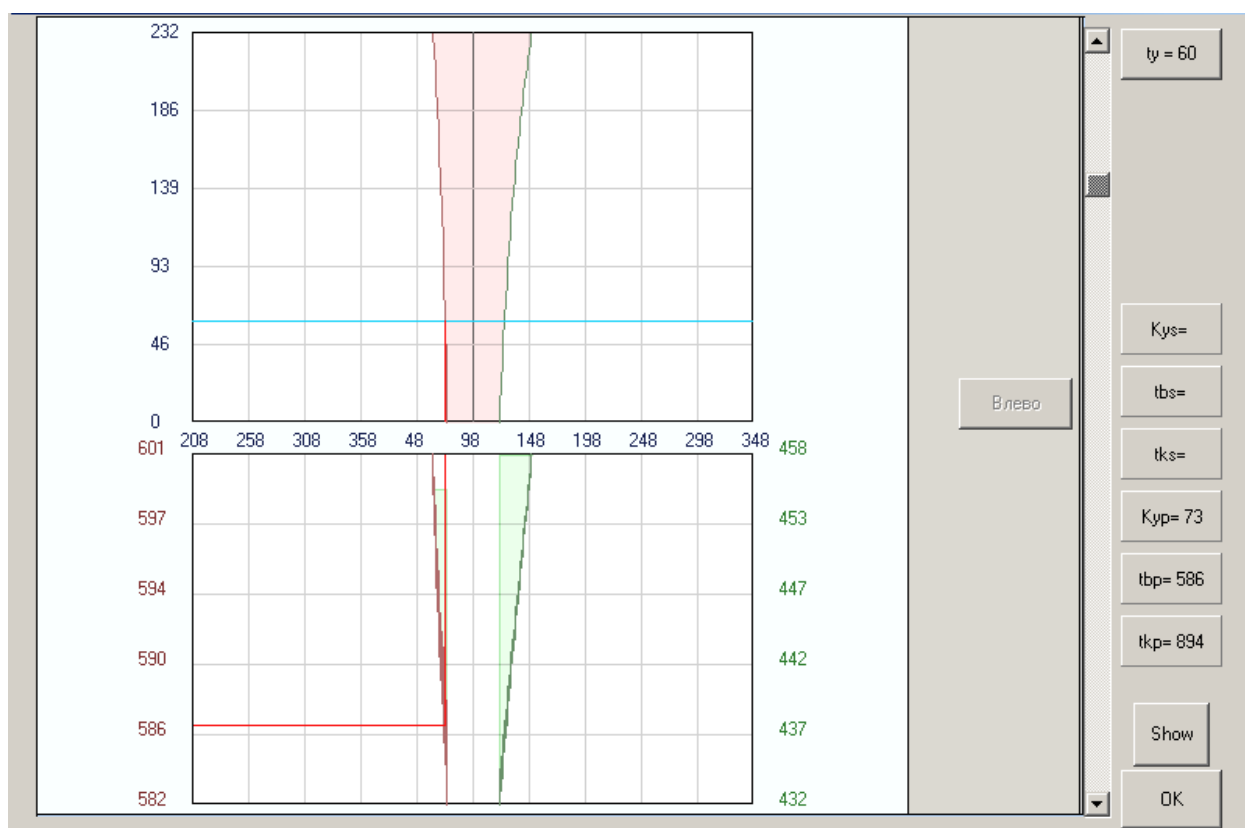


Рисунок 5.19 – Вибір маневру розходження ухиленням вліво

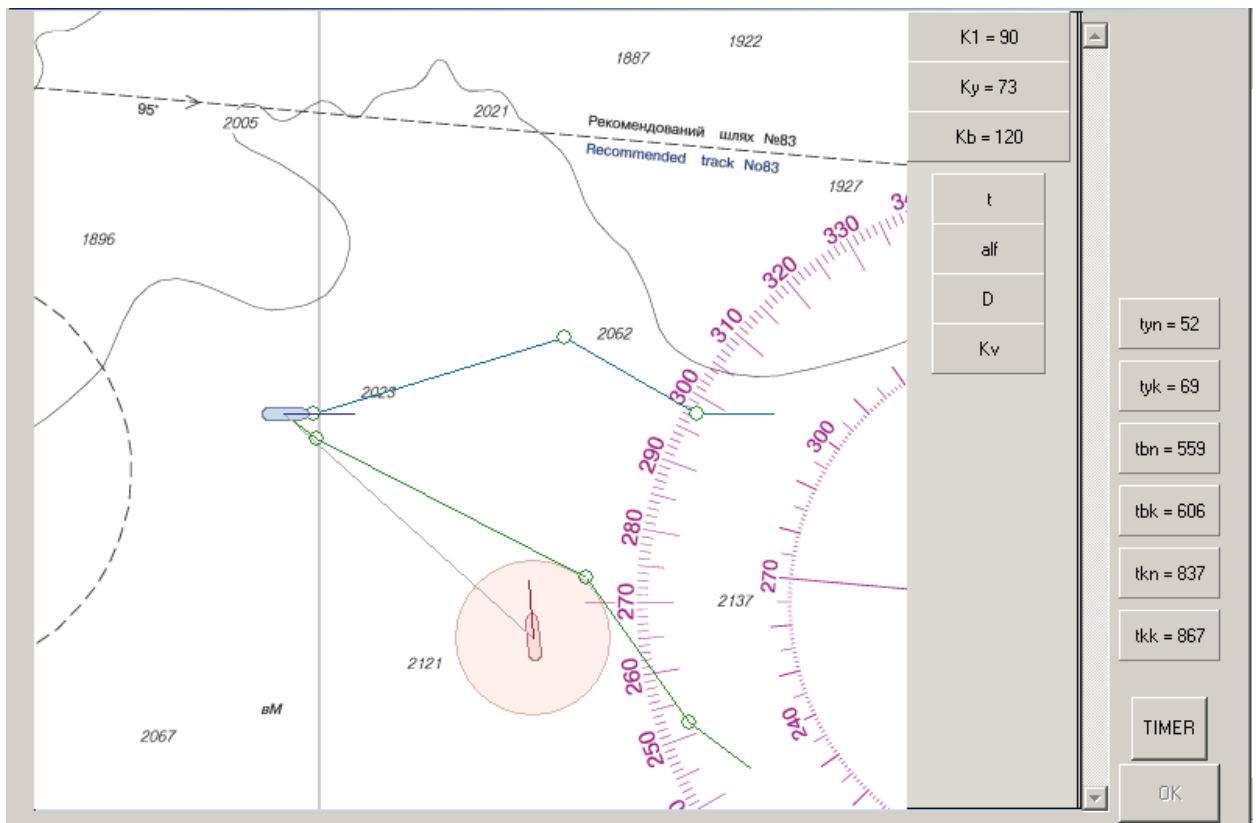


Рисунок 5.20 – Відображення істинної і відносної траєкторій розходження

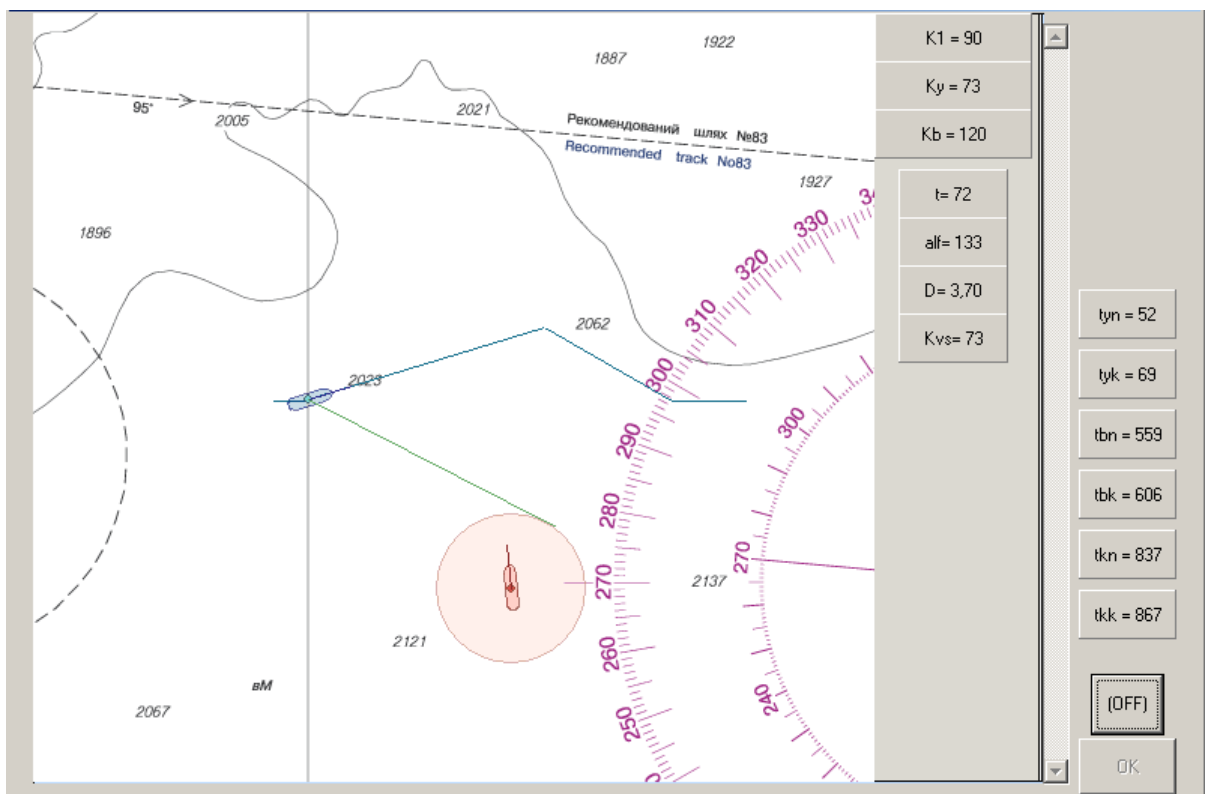


Рисунок 5.21 – Завершення повороту ухилення судна



### 5.3 Урахування навігаційних перешкод під час вибору маневру розходження

Розглянемо ситуацію 2 імітаційної програми, коли в районі небезпечного зближення суден є навігаційна перешкода, зважаючи на те, що швидкість судна менше швидкості цілі (рис. 5.24).

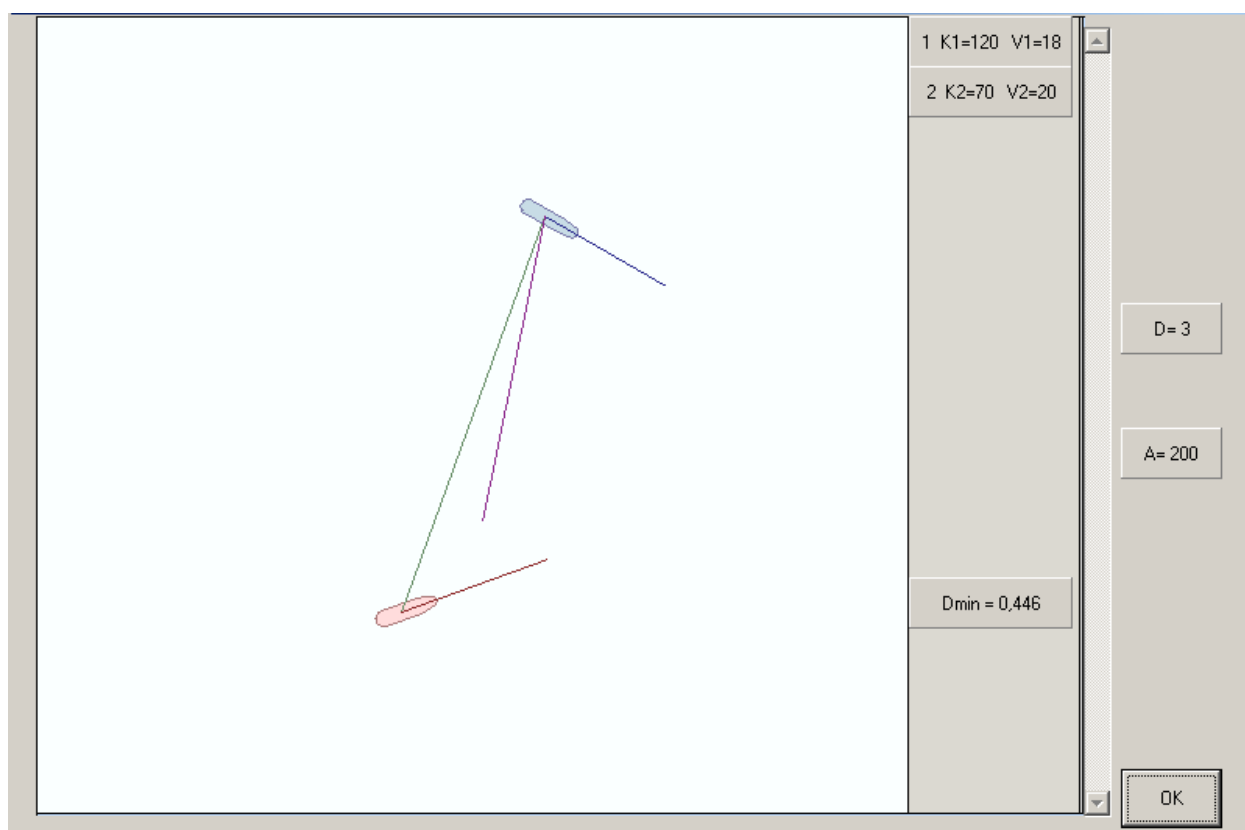


Рисунок 5.24 – Друга ситуація небезпечного зближення

На рисунку 5.25 показані області  $Q_{K,ty}$  і  $Q_{K,tb}$  другій ситуації небезпечного зближення. Оскільки швидкість судна менше цілі, то в даній ситуації можливе ухилення судна тільки управо, а області  $Q_{K,ty}$  і  $Q_{K,tb}$  мають тільки праву частину. Тому вибраний маневр розходження ухиленням управо з моментом часу початку ухилення рівним 50 с, (рис. 5.26), зважаючи на те, що курс

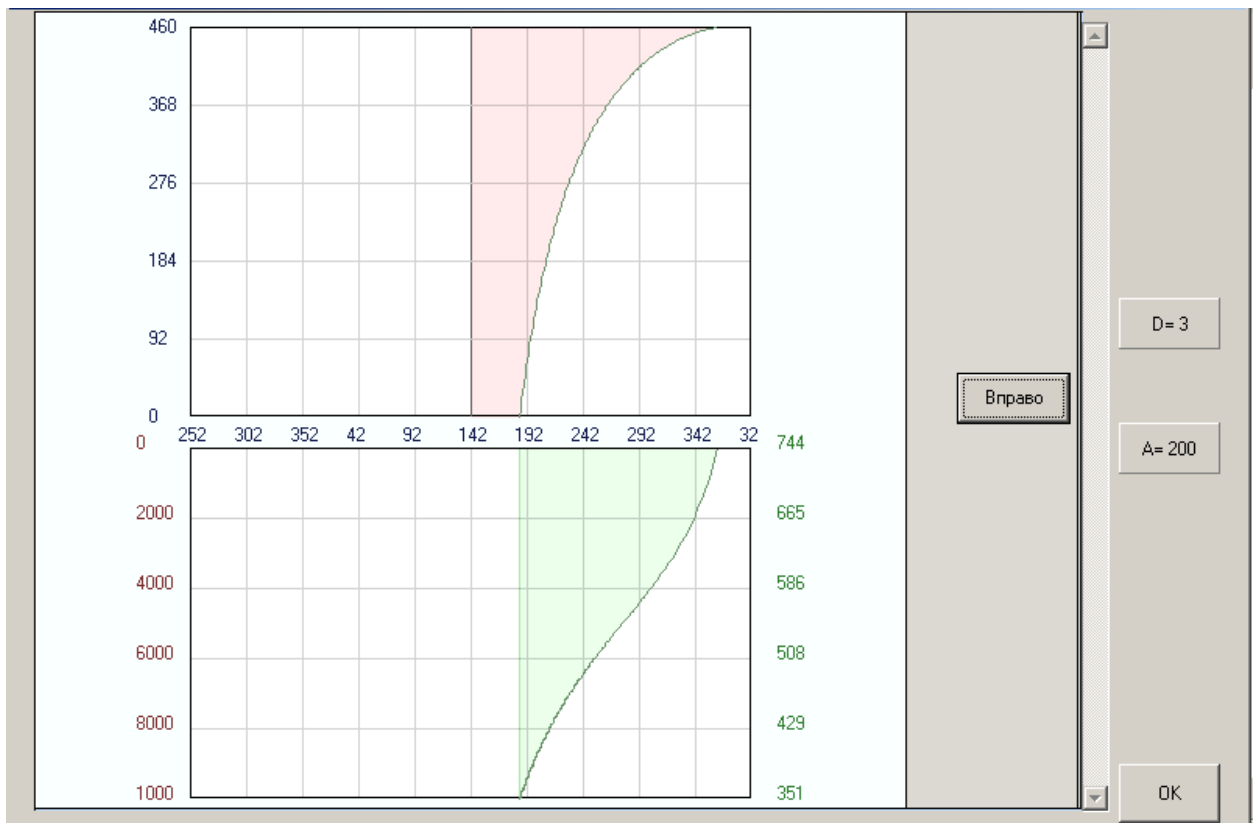


Рисунок 5.25 – Области  $Q_{K,ty}$  і  $Q_{K,tb}$  другої ситуації небезпечного зближення

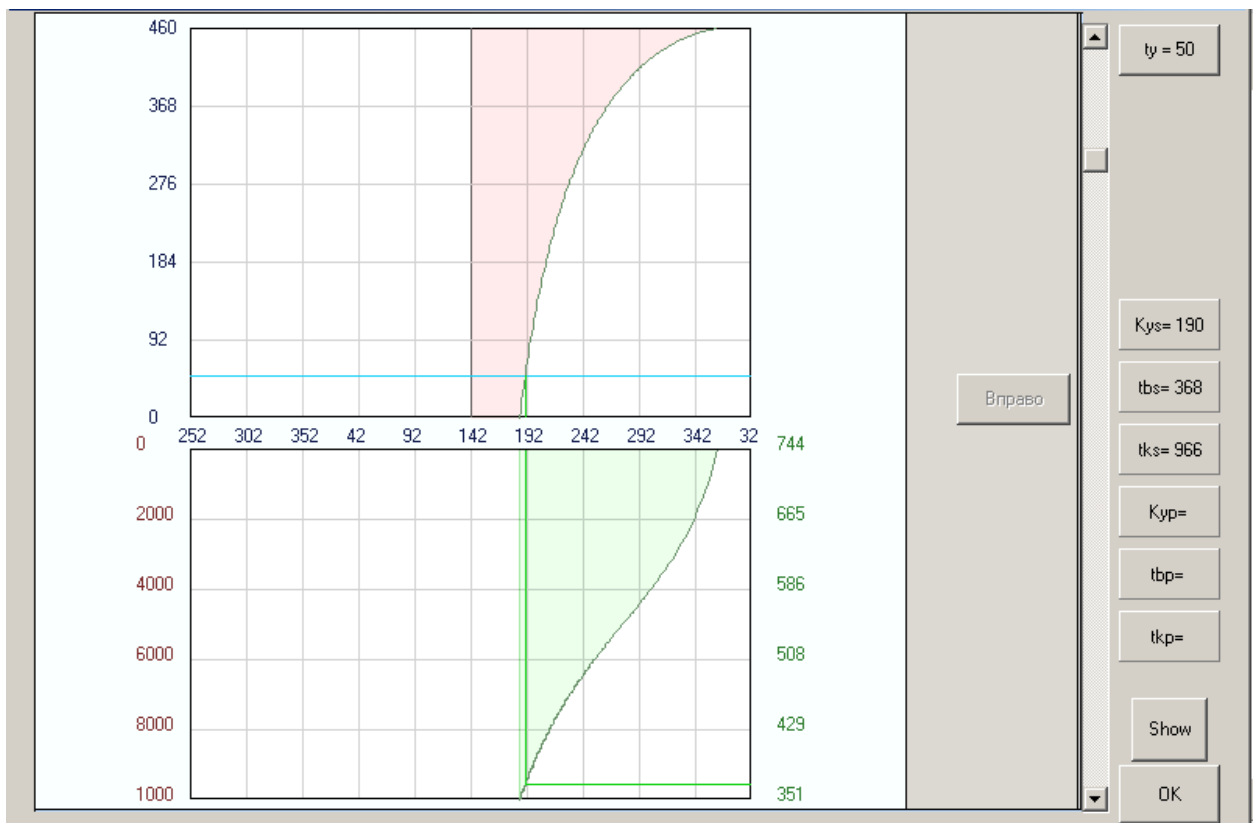


Рисунок 5.26 – Вибір маневру розходження ухиленням управо

ухилення  $K_y = 190^\circ$ . На рисунку 5.27 показане відображення істинної і відносної траєкторій розходження, зважаючи на те, що за такого маневру розходження судно на ділянці ухилення потрапляє на навігаційну небезпеку. Тому проводимо

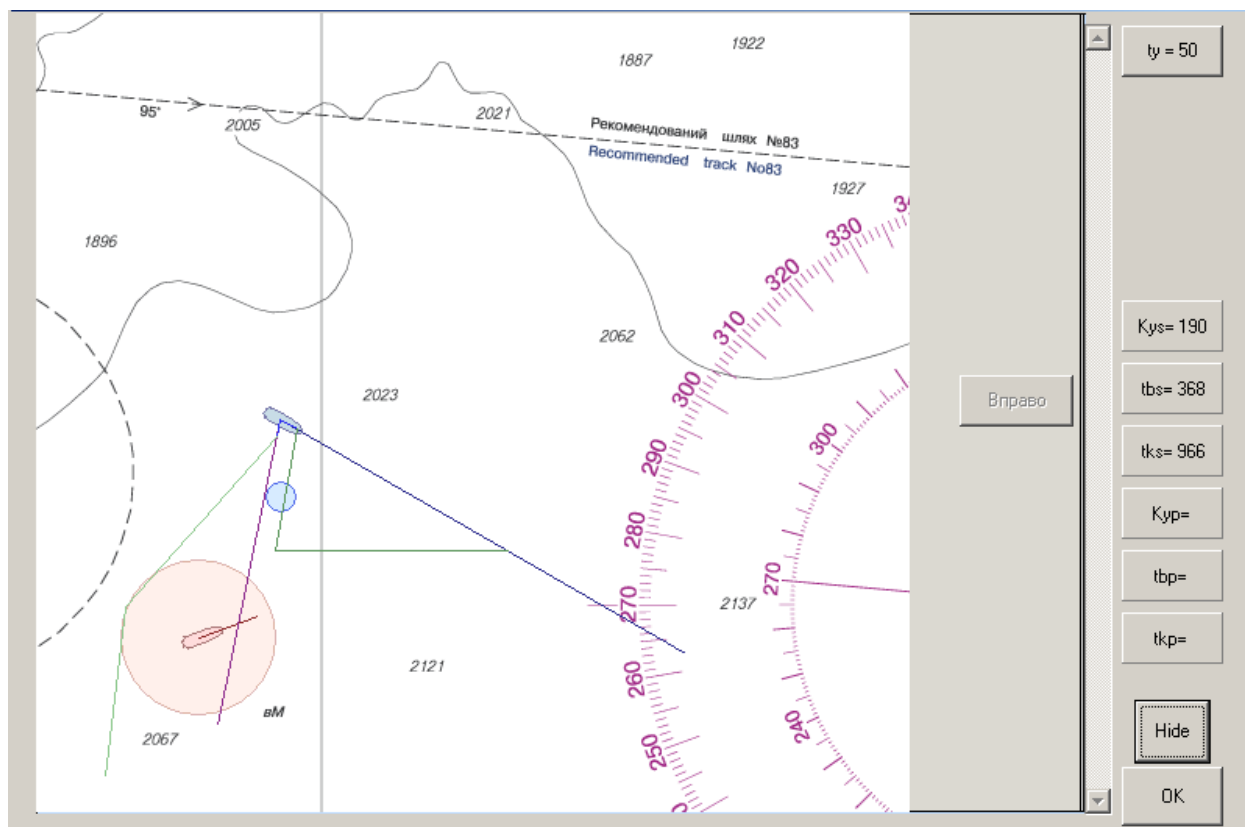


Рисунок 5.27 –Початкові істинна і відносна траєкторії розходження

повторний вибір маневру розходження, збільшуючи час початку ухилення до 180 с (рис. 5.28). Перевіркою маневру показано, що в цьому випадку судно безпечно розходиться з цілю, уникаючи попадання на навігаційну небезпеку (рис. 5.29).

На рисунках 5.30 - 5.32 показані результати імітаційного моделювання маневру розходження. Процес розходження у момент часу завершення повороту ухилення судна на ділянку ухилення від небезпечної цілі показаний на рисунку 5.30. Поворот судна на ділянку виходу маневру розходження для повернення на програмну траєкторію руху відображено на рисунку 5.31.



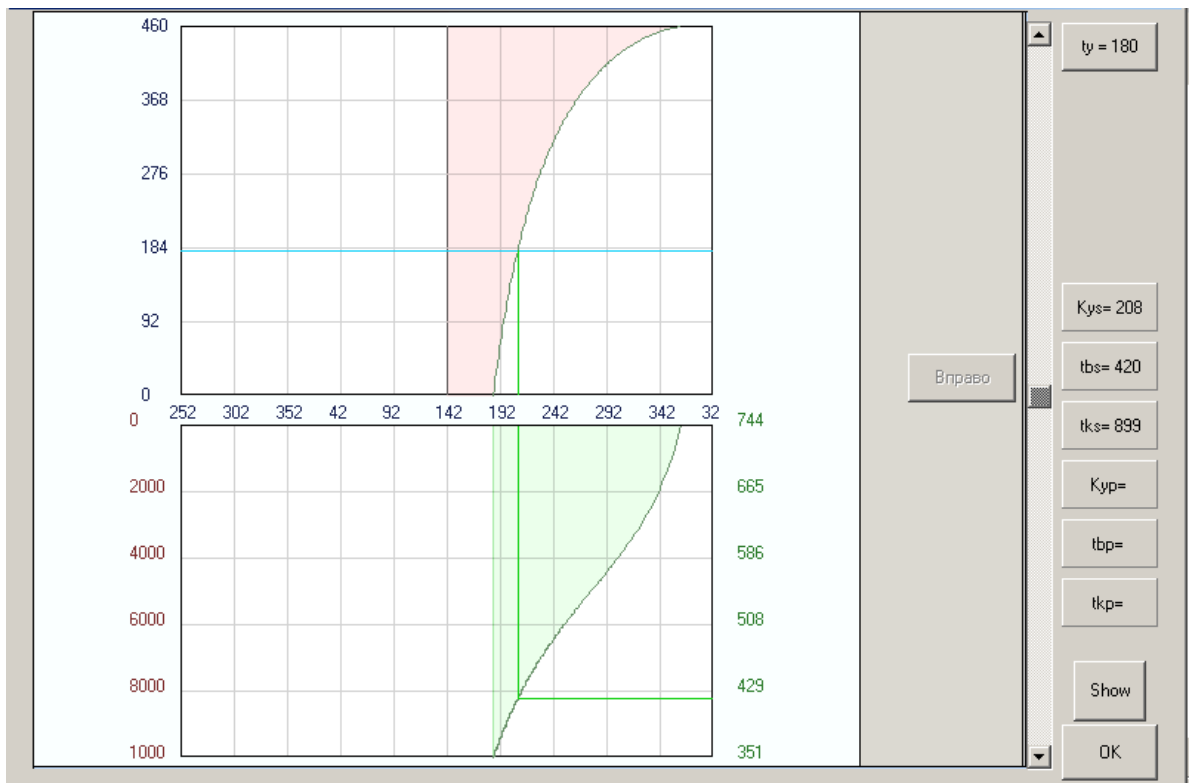


Рисунок 5.28 –Повторний вибір моменту часу початку ухилення

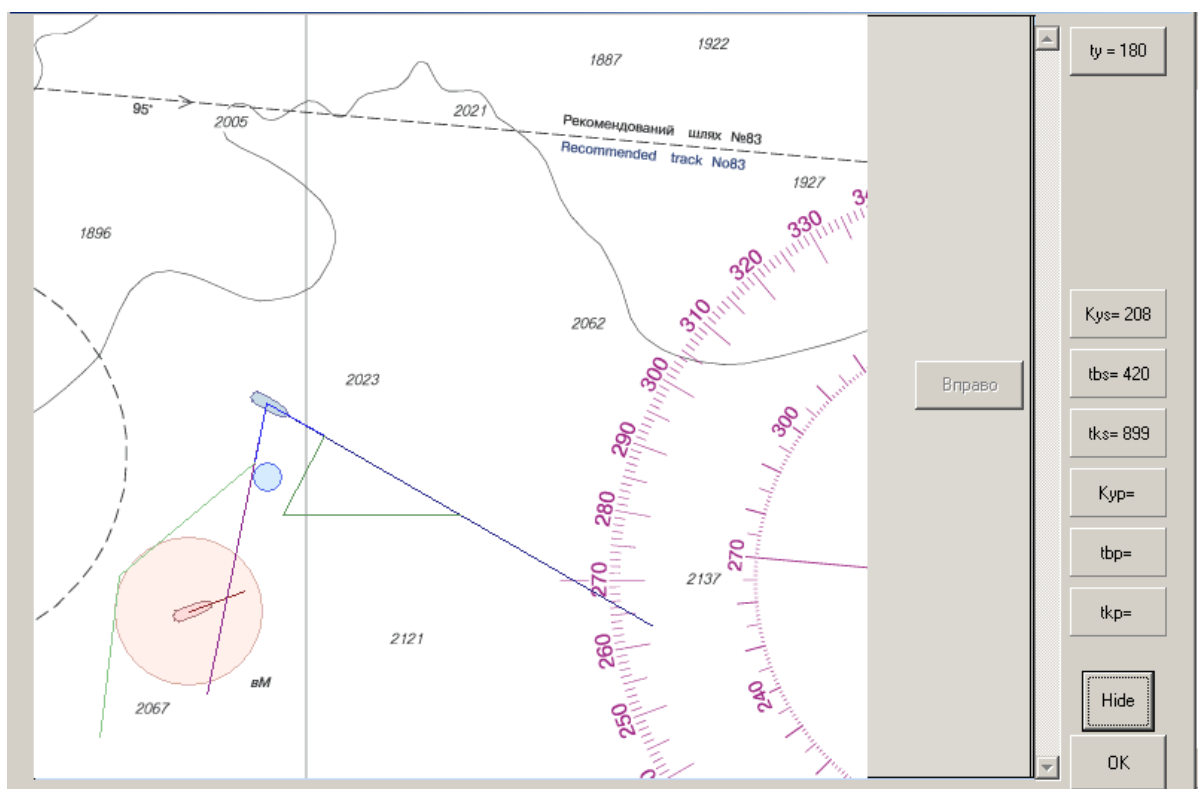


Рисунок 5.29 –Траєкторії розходження після повторного вибору ухилення

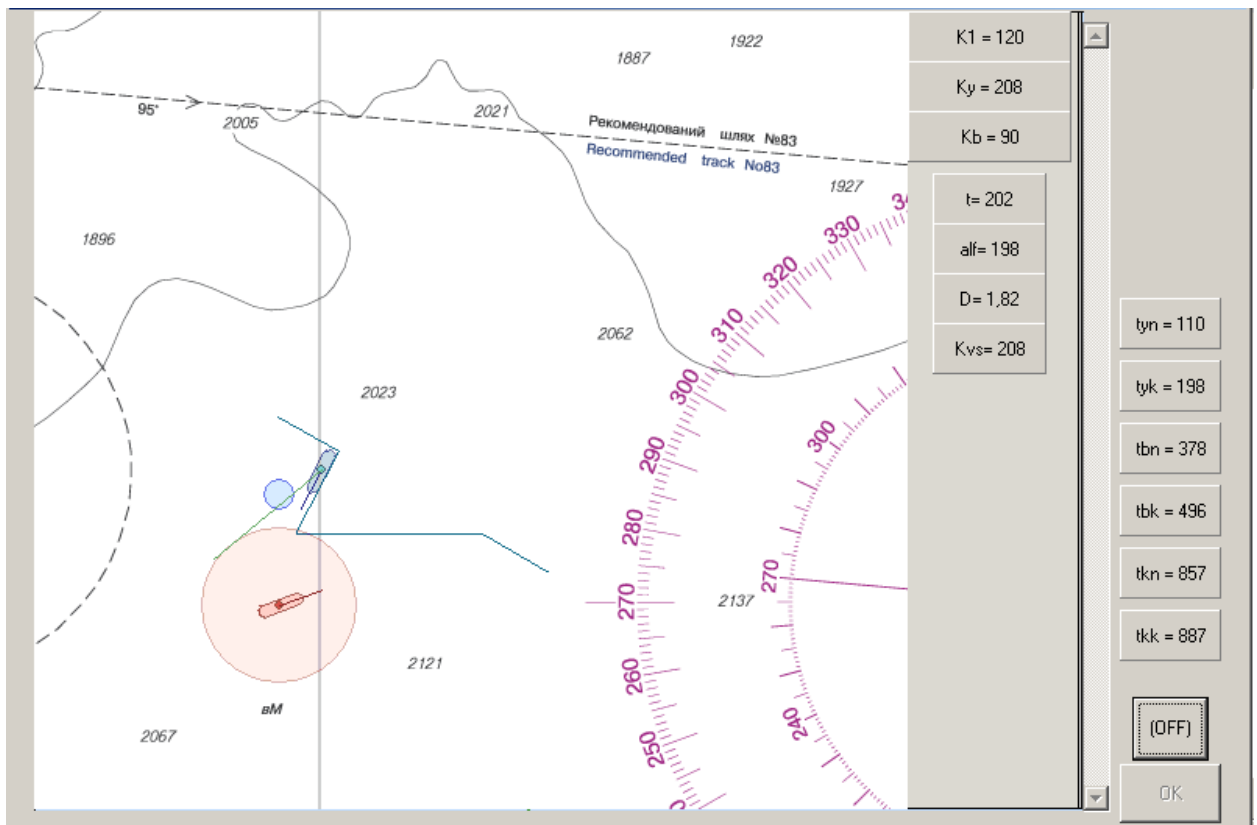


Рисунок 5.30 – Завершення повороту ухилення

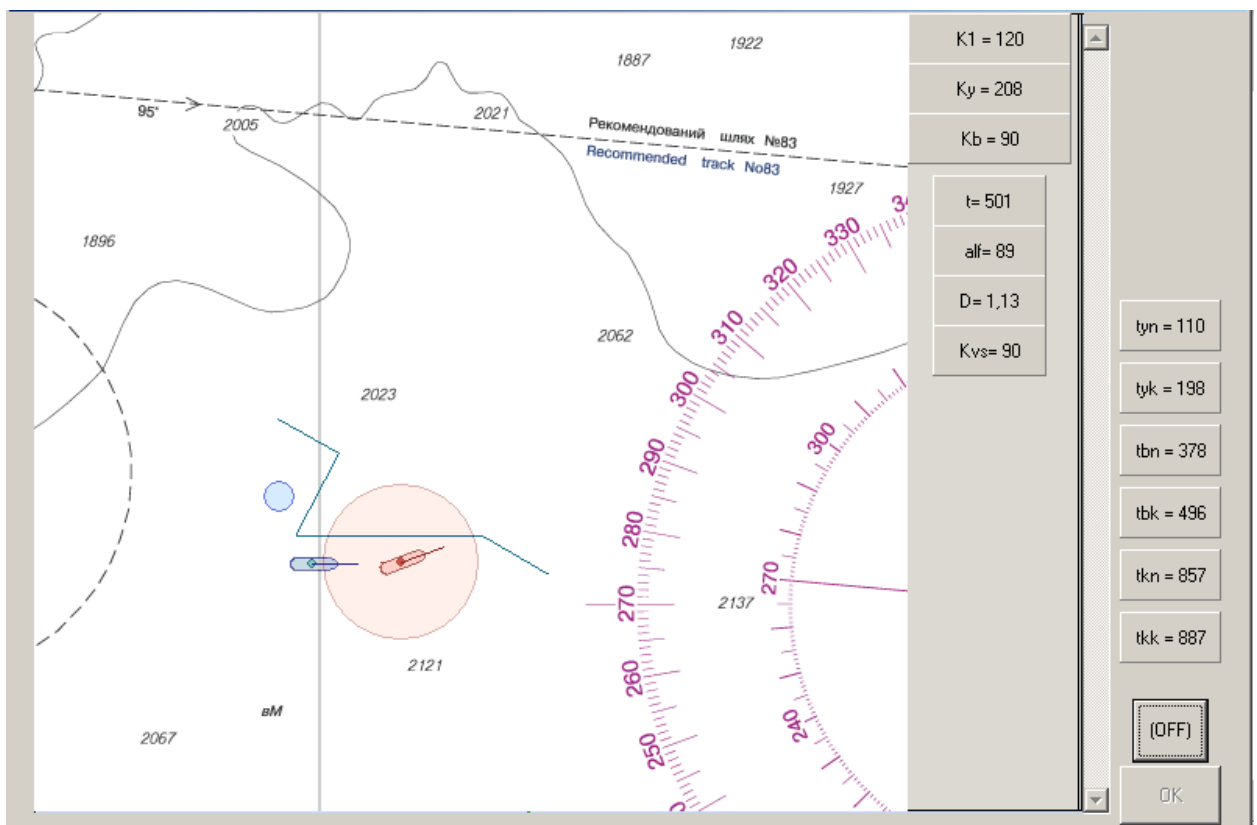


Рисунок 5.31 – Завершення повороту виходу

На рисунку 5.32 показано поворот судна на програмну траєкторію руху після завершення маневру розходження ухиленням управо.

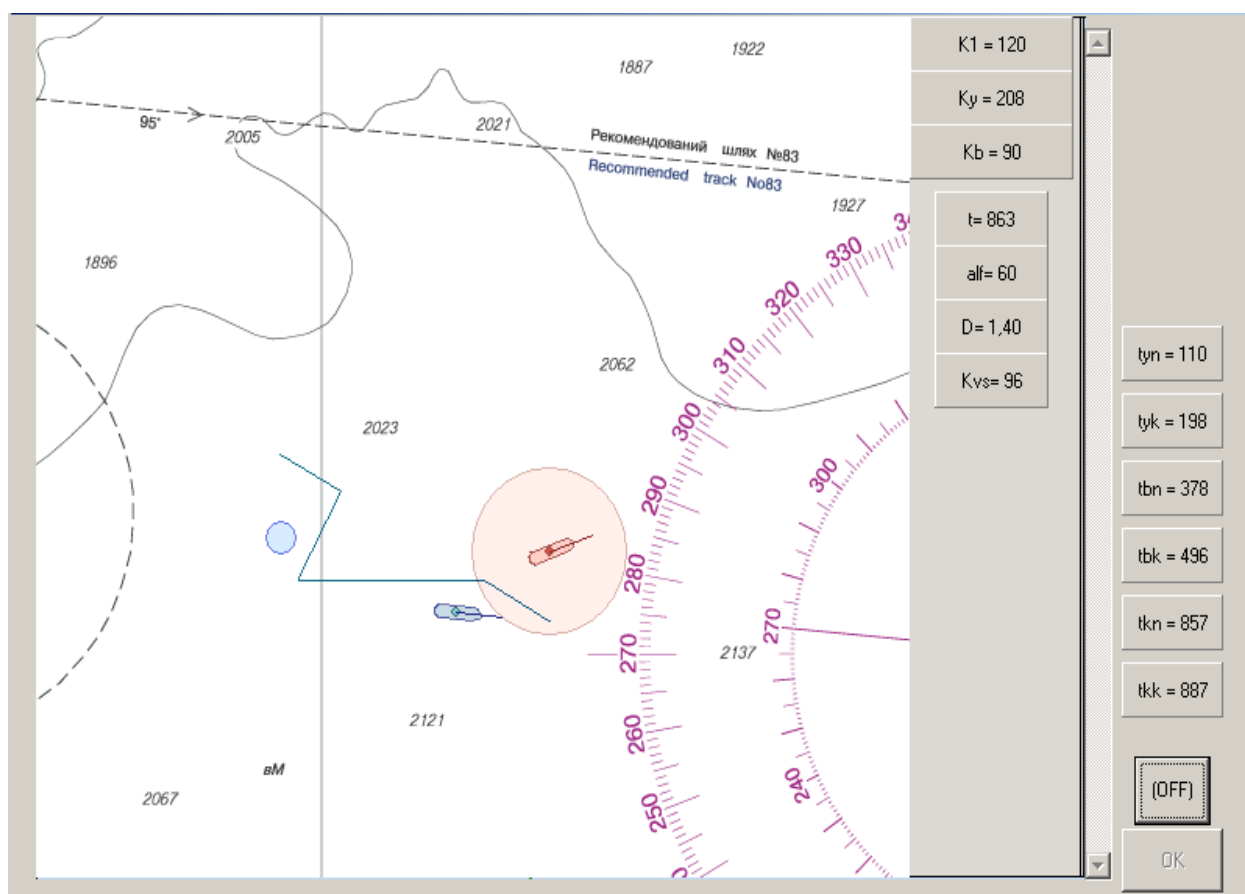


Рисунок 5.32 – Початок повороту на програмну траєкторію

Розглянемо ситуацію з небезпечного зближення імітаційної програми, параметри якої і графічне відображення приведені на рисунку 5.33. У даній ситуації швидкість судна менше швидкості цілі, що відображено на лівій частині області  $Q_{K,ty}$  (рис. 5.34). На рисунку 5.35 показано вибір маневру розходження ухиленням управо з параметрами  $t_y = 58$  с і  $K_y = 132^\circ$ , який, як випливає з рисунку 5.36, не є безпечним, оскільки істинна траєкторія розходження проходить через навігаційну перешкоду. Збільшенням значення  $t_y = 175$  с і  $K_y = 151^\circ$  повторно вибраний маневр розходження (рис. 5.37), який є безпечним (рис. 5.38).

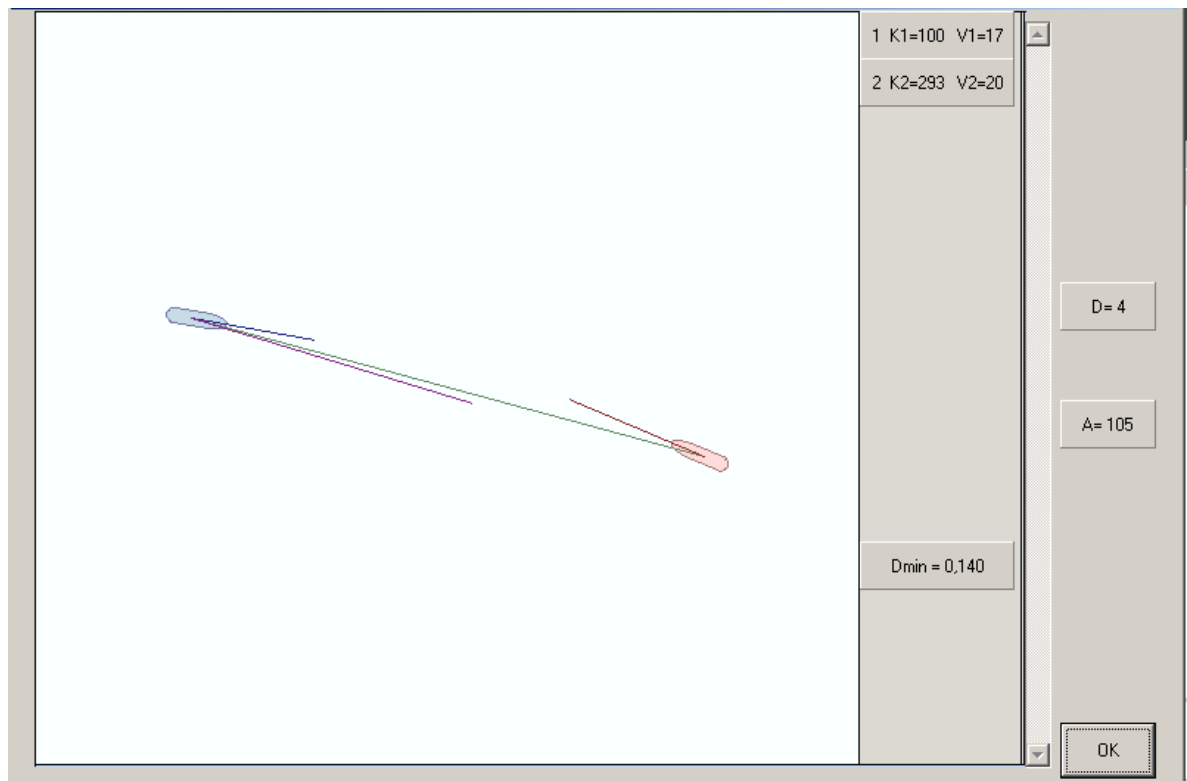


Рисунок 5.33 – Третя ситуація небезпечного зближення імітаційної програми

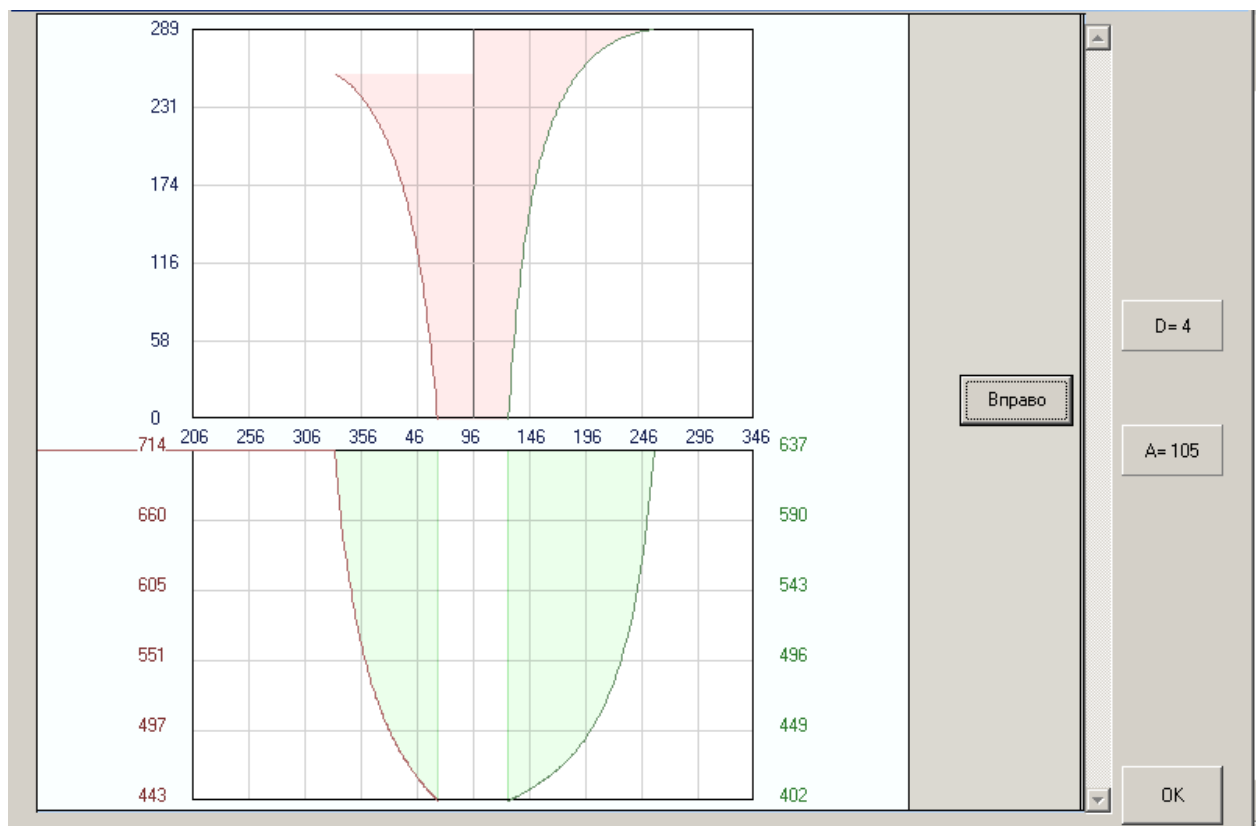


Рисунок 5.34 – Области  $Q_{K,ty}$  і  $Q_{K,tb}$  третьої ситуації небезпечного зближення

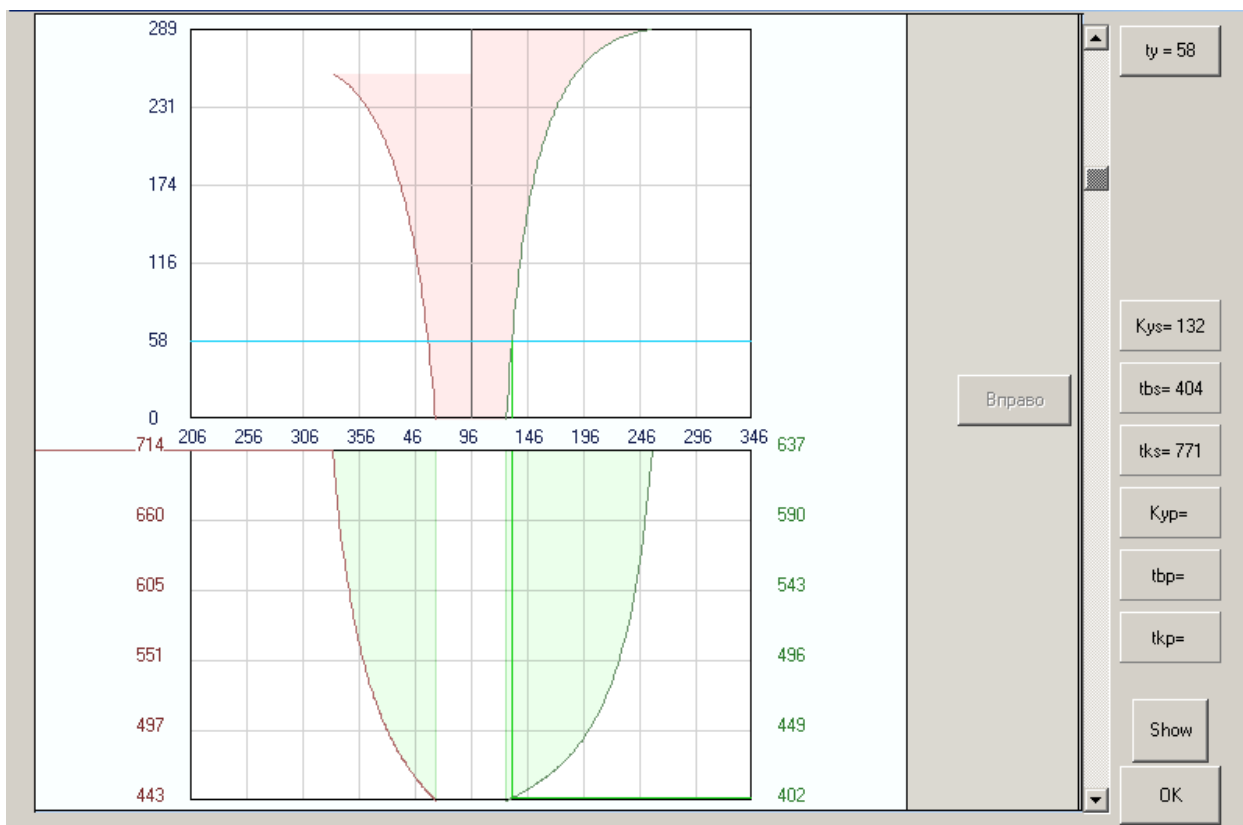


Рисунок 5.35 – Вибір маневру розходження ухиленням управо (ситуація 3)

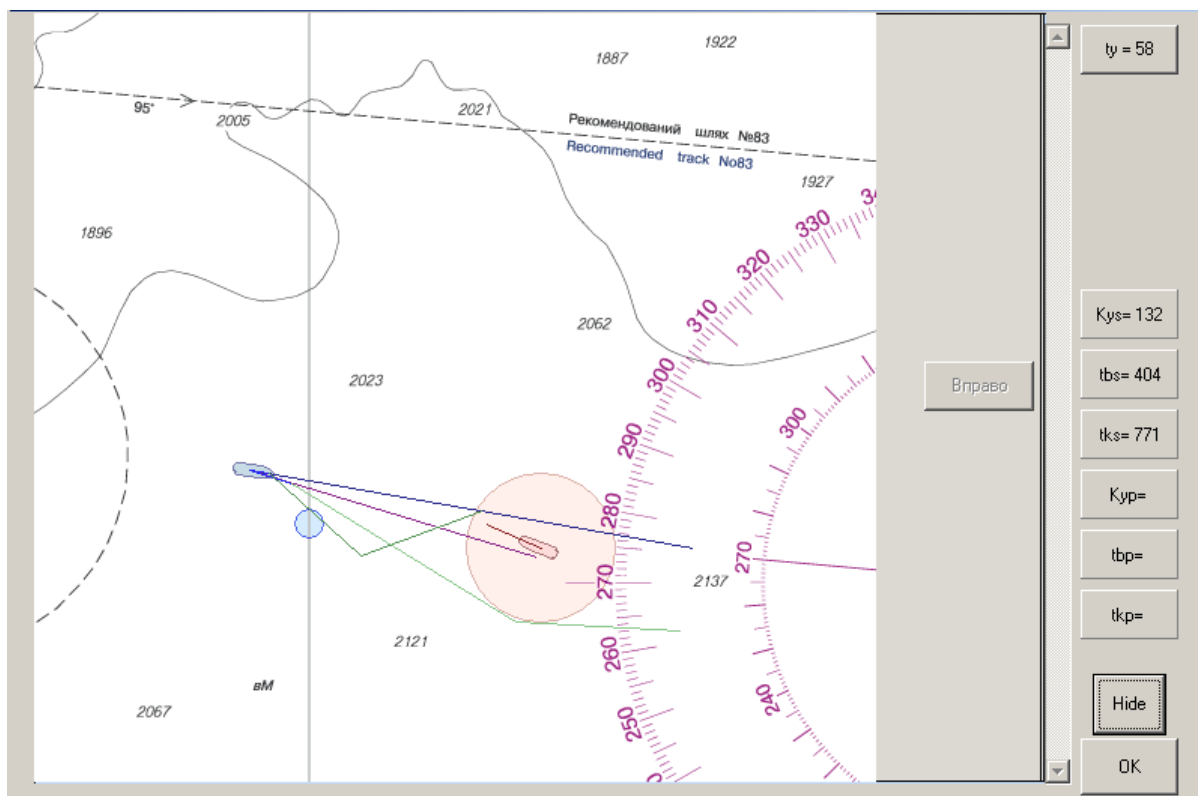


Рисунок 5.36 – Початкові траєкторії розходження в ситуації 3

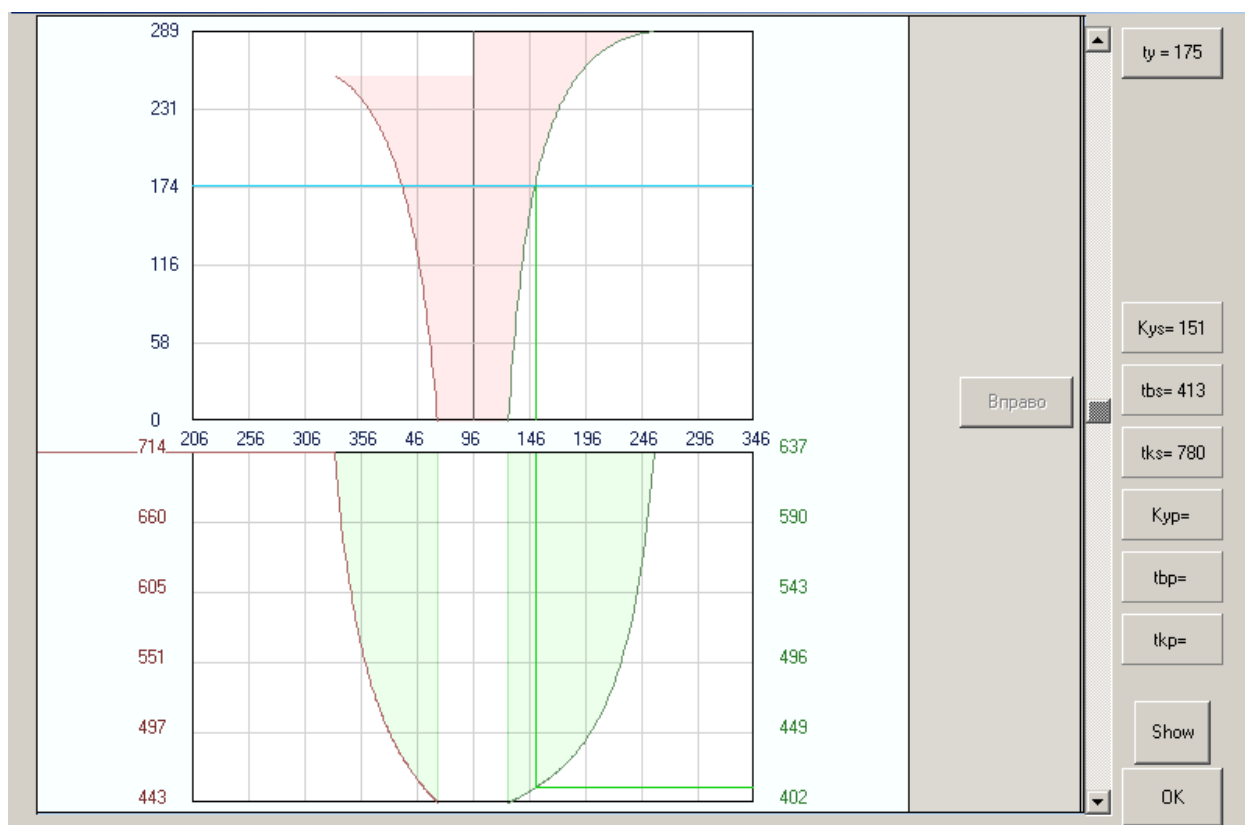


Рисунок 5.37 – Повторний вибір маневру розходження в ситуації 3

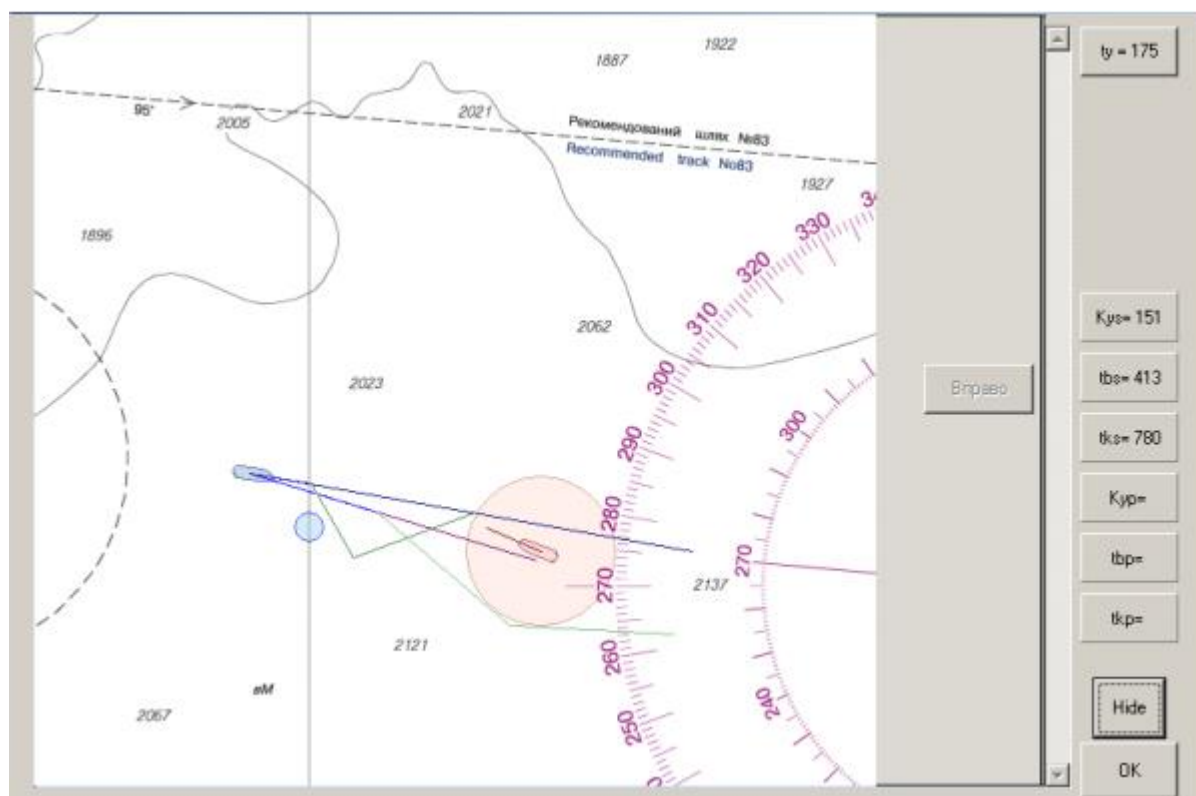


Рисунок 5.38 – Повторні траєкторії розходження в ситуації 3 зближення

Результати імітаційного моделювання маневру розходження представлені на рисунках 5.39 - 5.41. На рисунку 5.39 показано процес розходження у момент часу завершення повороту ухилення судна на ділянку ухилення від небезпечної цілі. Поворот судна на ділянку виходу маневру розходження для повернення на програмну траєкторію руху представлено на рисунку 5.40, а на рисунку 5.41 показано поворот судна на програмну траєкторію руху після завершення маневру розходження.

На рисунку 5.42 показана ситуація 5 імітаційної програми зближення суден на контркурсах, а на рисунку 5.43 представлені відповідні їй області  $Q_{K,ty}$  і  $Q_{K,tb}$ . Вибір маневру розходження ухиленням управо у момент часу  $t_y = 50$ с на курс  $K_y = 70^\circ$  показано на рисунку 5.44.

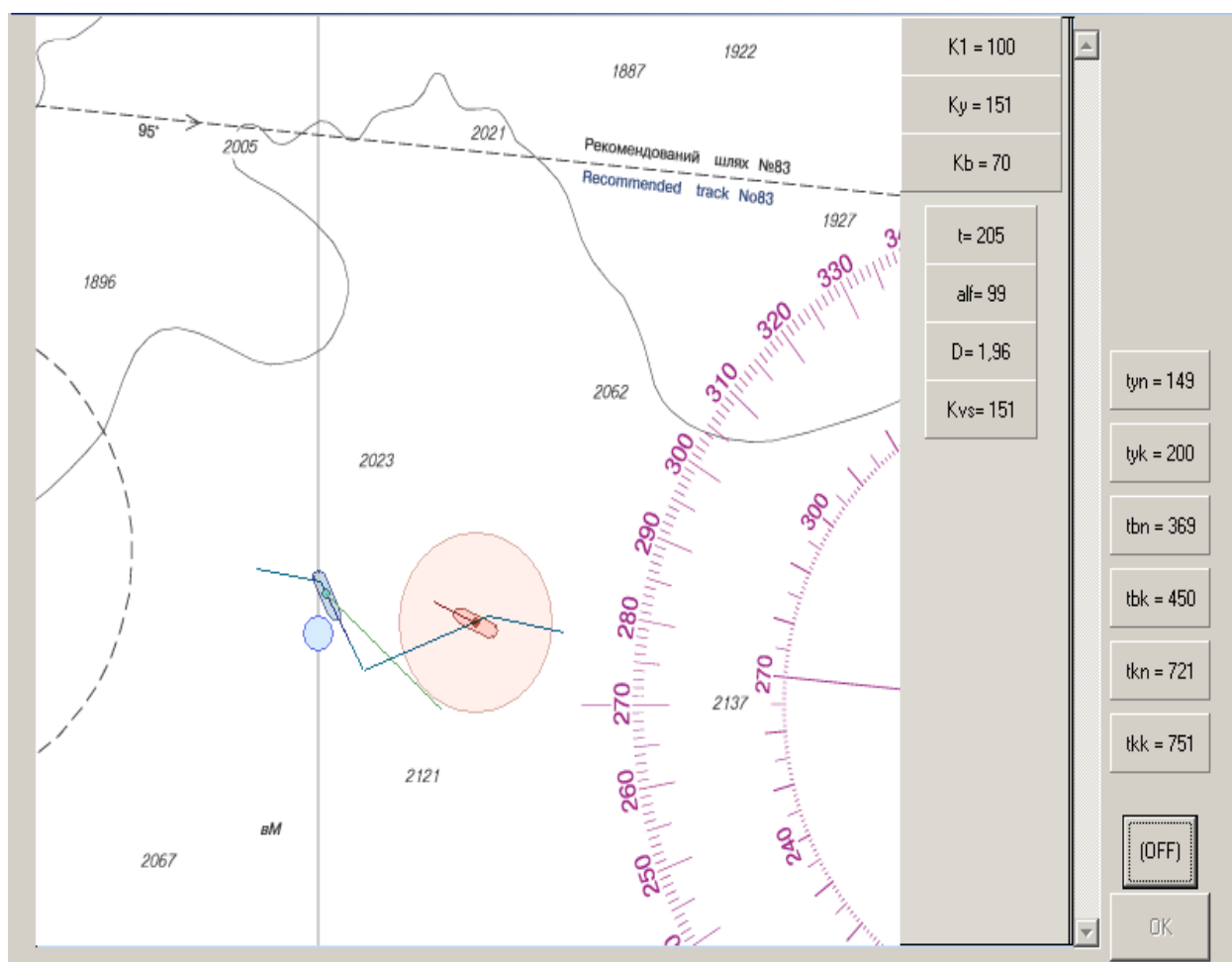


Рисунок 5.39 – Завершення повороту ухилення (ситуація 3)

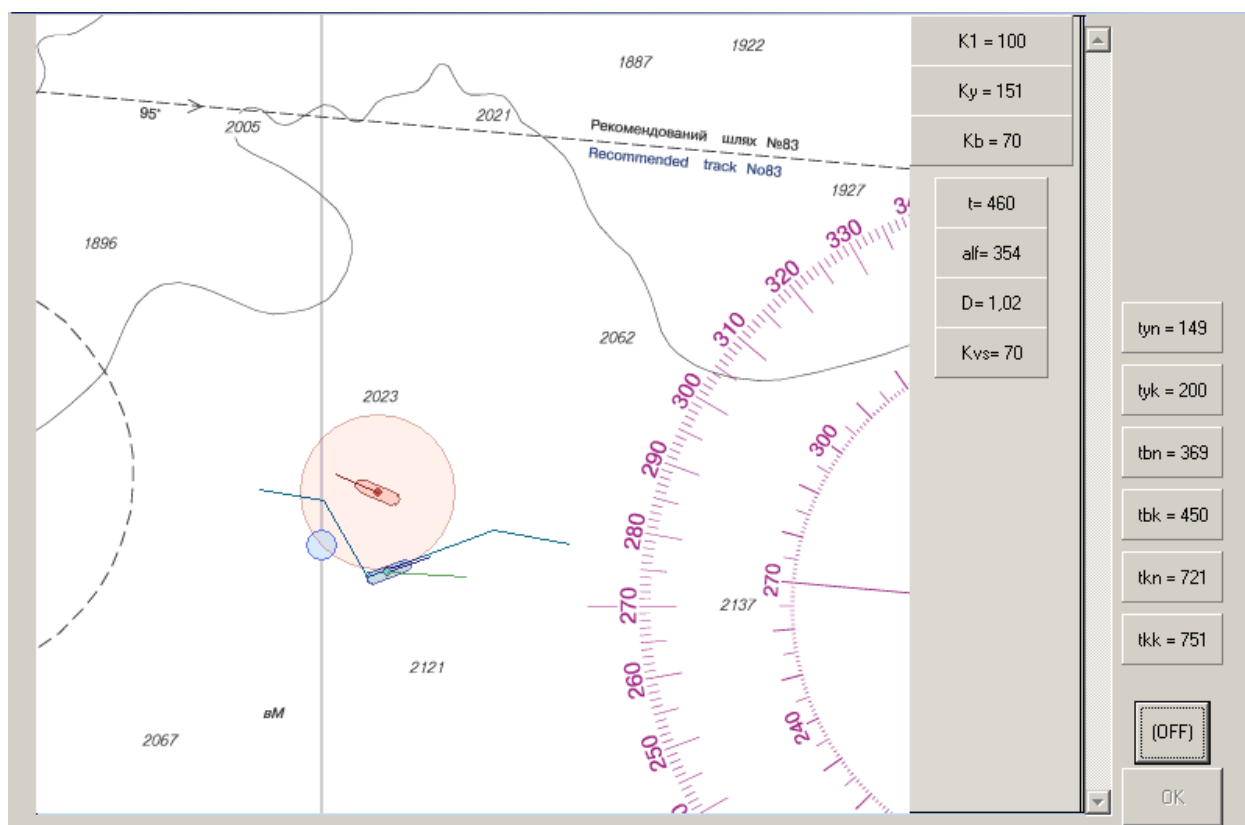


Рисунок 5.40 – Завершення повороту виходу (ситуація 3)

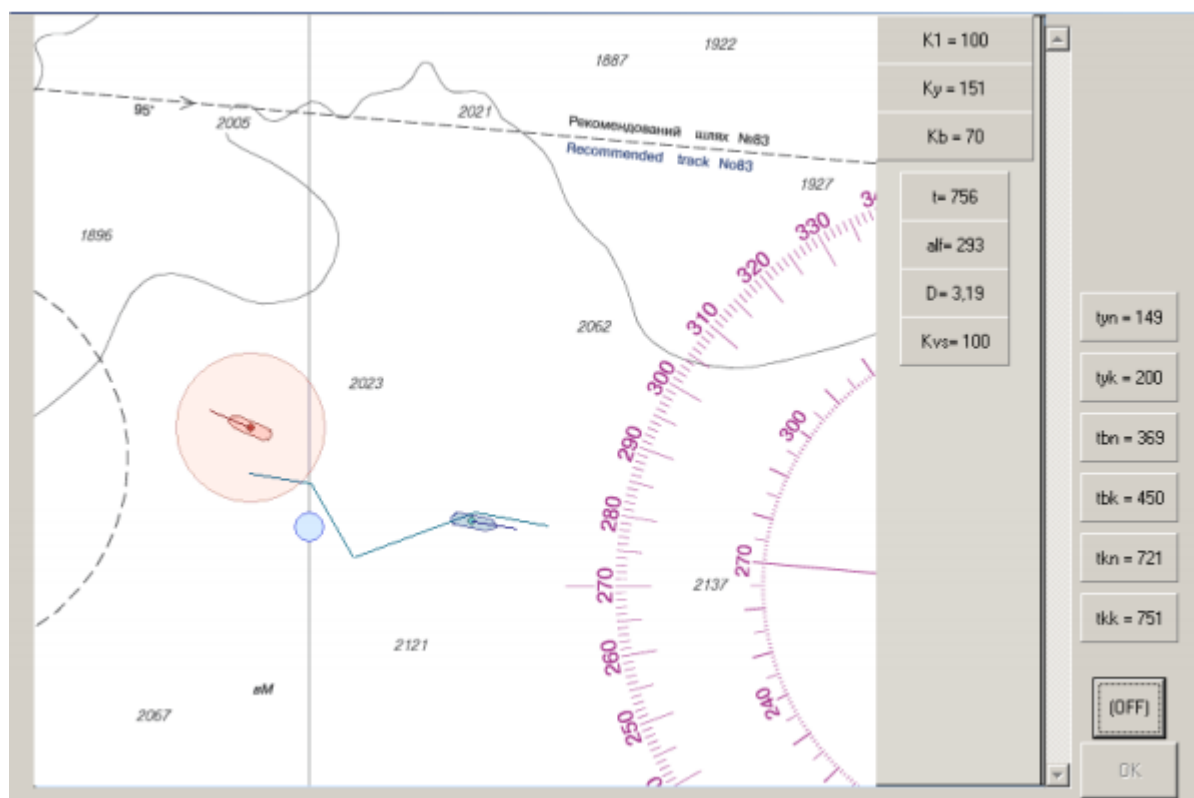


Рисунок 5.41 – Завершення повороту на програмну траєкторію (ситуація 3)



Після перевірки (рис. 5.45), якщо вибраний маневр з даними параметрами ухилення виявився небезпечним, оскільки його істинна траєкторія розходження на ділянці ухилення потрапляє на навігаційну небезпеку, тому був проведений повторний вибір маневру ухилення збільшенням моменту часу початку ухилення до  $t_y = 150$  с і  $K_y = 85^\circ$  (рис. 5.46). Перевірка показала, що маневр розходження за цих параметрів є безпечним (рис. 5.47).

Запропонований повторний маневр прийнятий остаточним для реалізації процесу розходження і показаний на рисунку 5.48. Надалі проводилося імітаційне моделювання вибраного процесу розходження, результати якого представлені на рисунках 5.49 - 5.51.

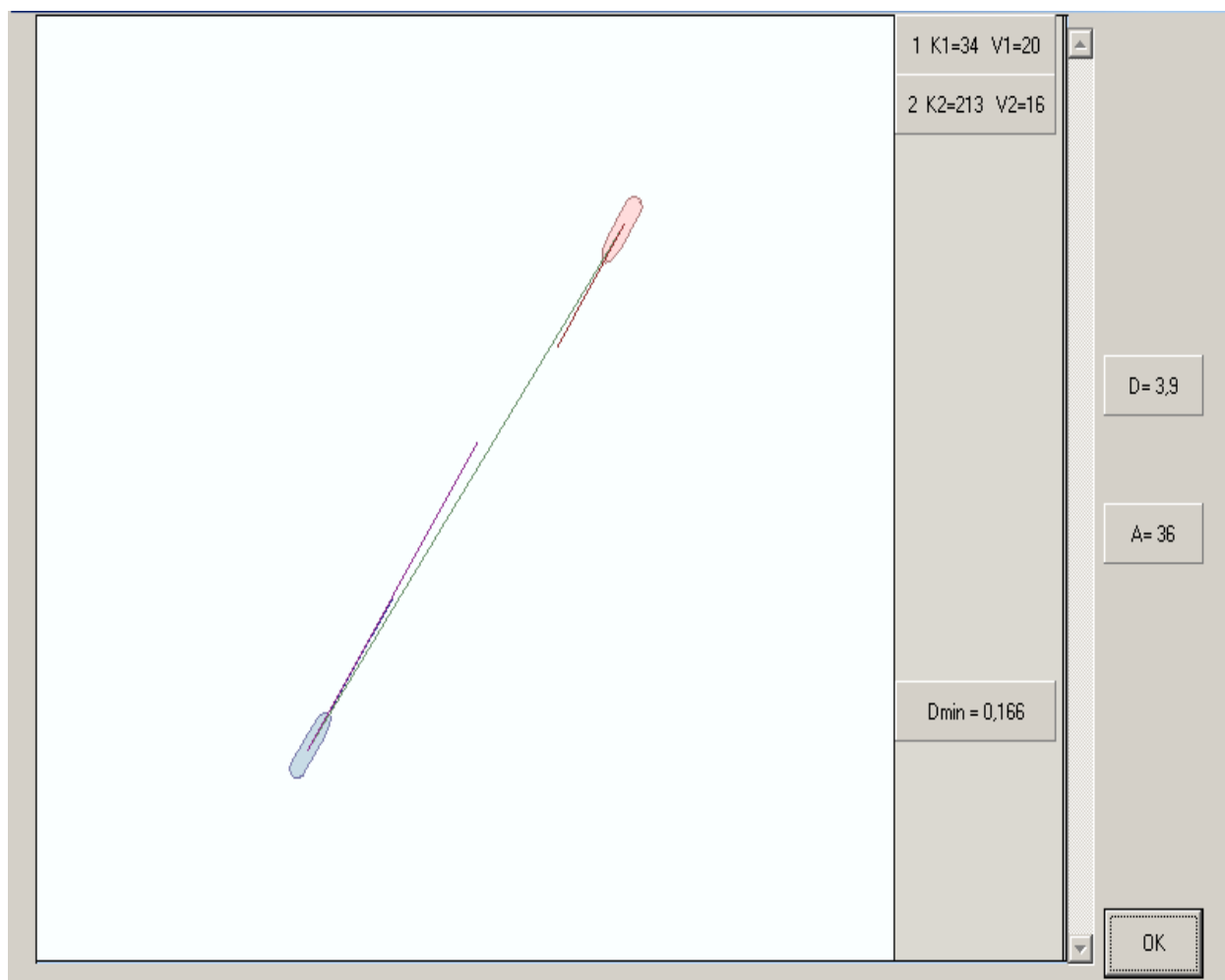


Рисунок 5.42 – П'ята ситуація небезпечного зближення суден

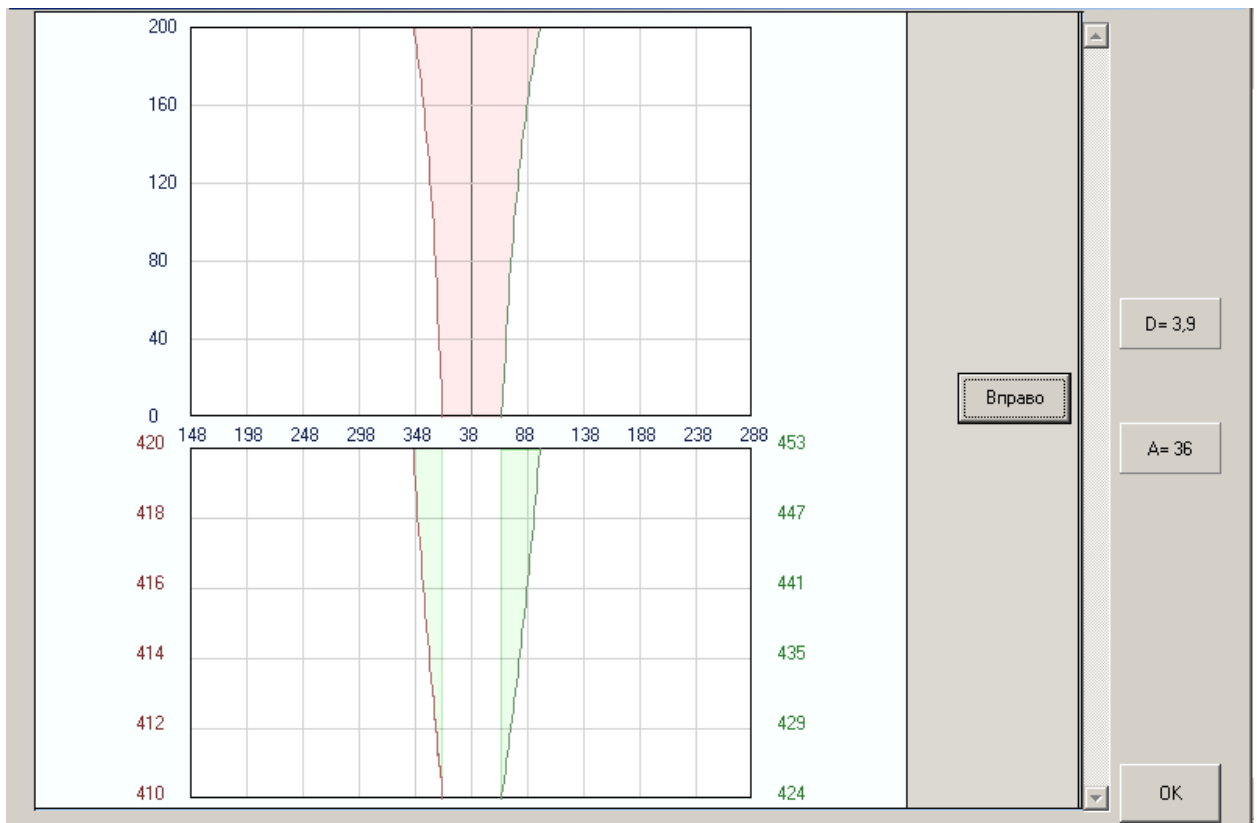


Рисунок 5.43 – Области  $Q_{K,ty}$  і  $Q_{K,tb}$  п'ятої ситуації небезпечного зближення

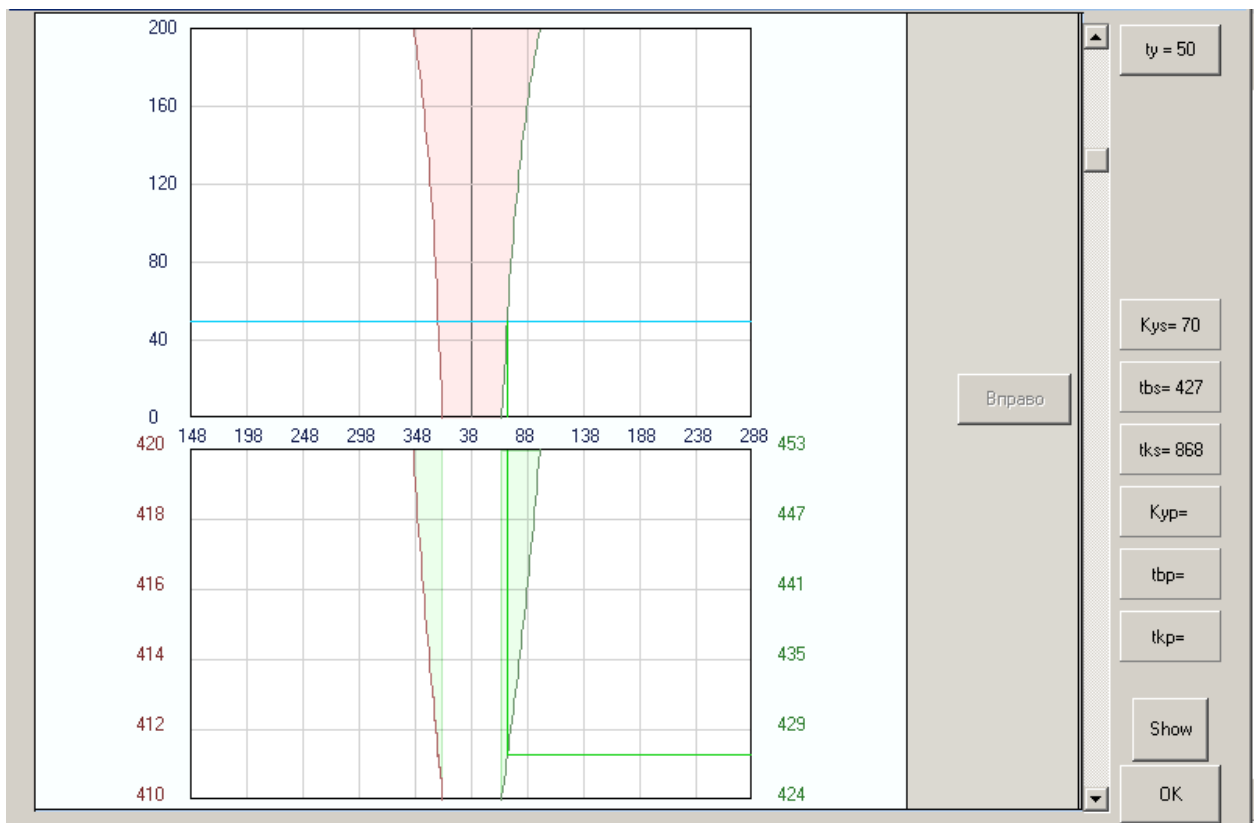


Рисунок 5.44 –. Вибір маневру розходження ухиленням управо (ситуація 5)

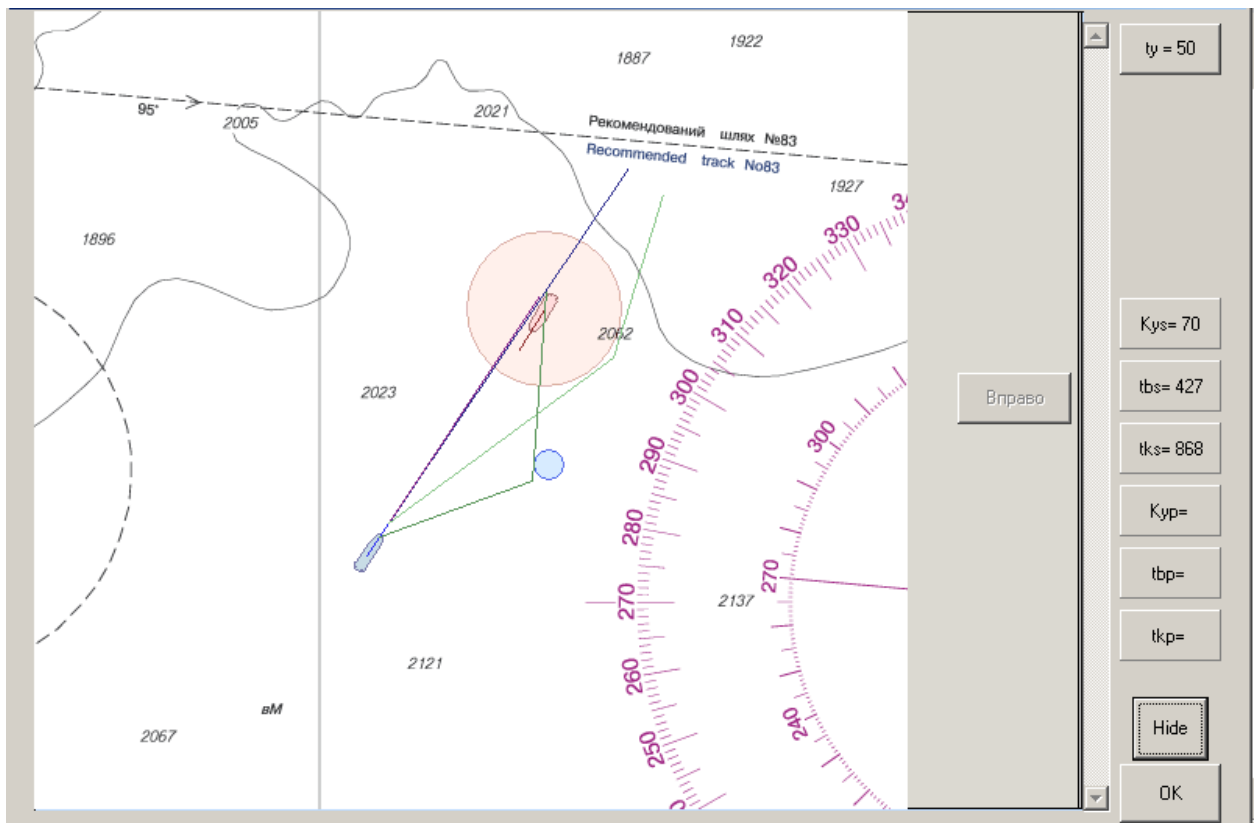


Рисунок 5.45 – Небезпечний маневр розходження (ситуація 5)

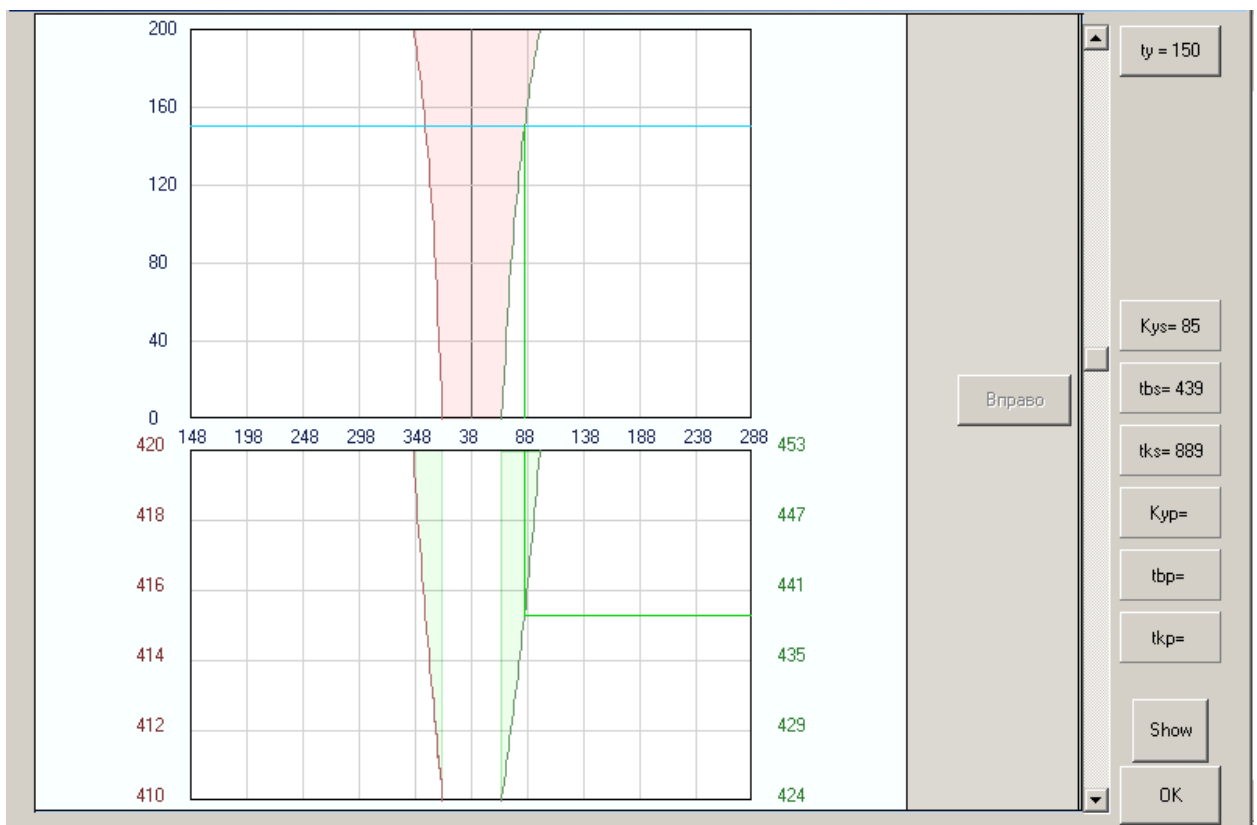


Рисунок 5.46 – Повторний вибір маневру розходження (ситуація 5)

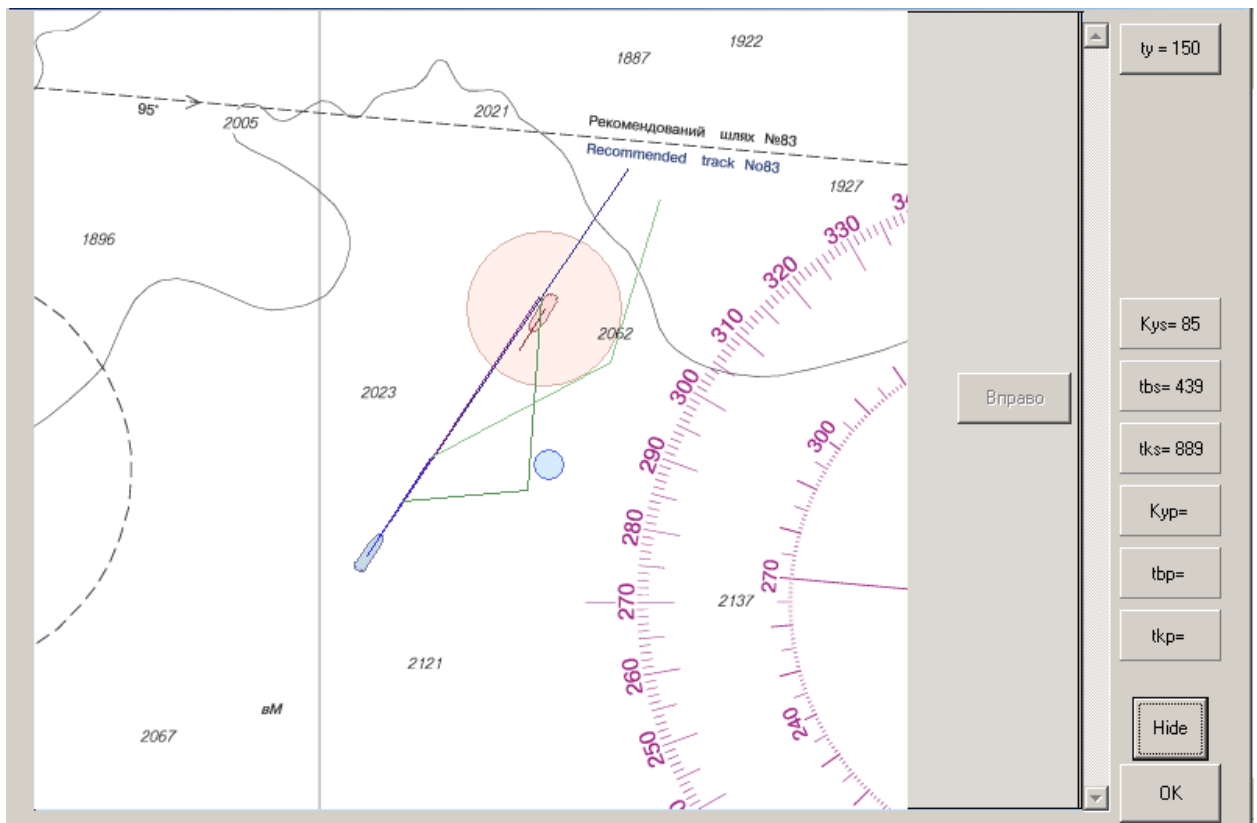


Рисунок 5.47 – Траєкторії розходження повторного маневру (ситуація 5)

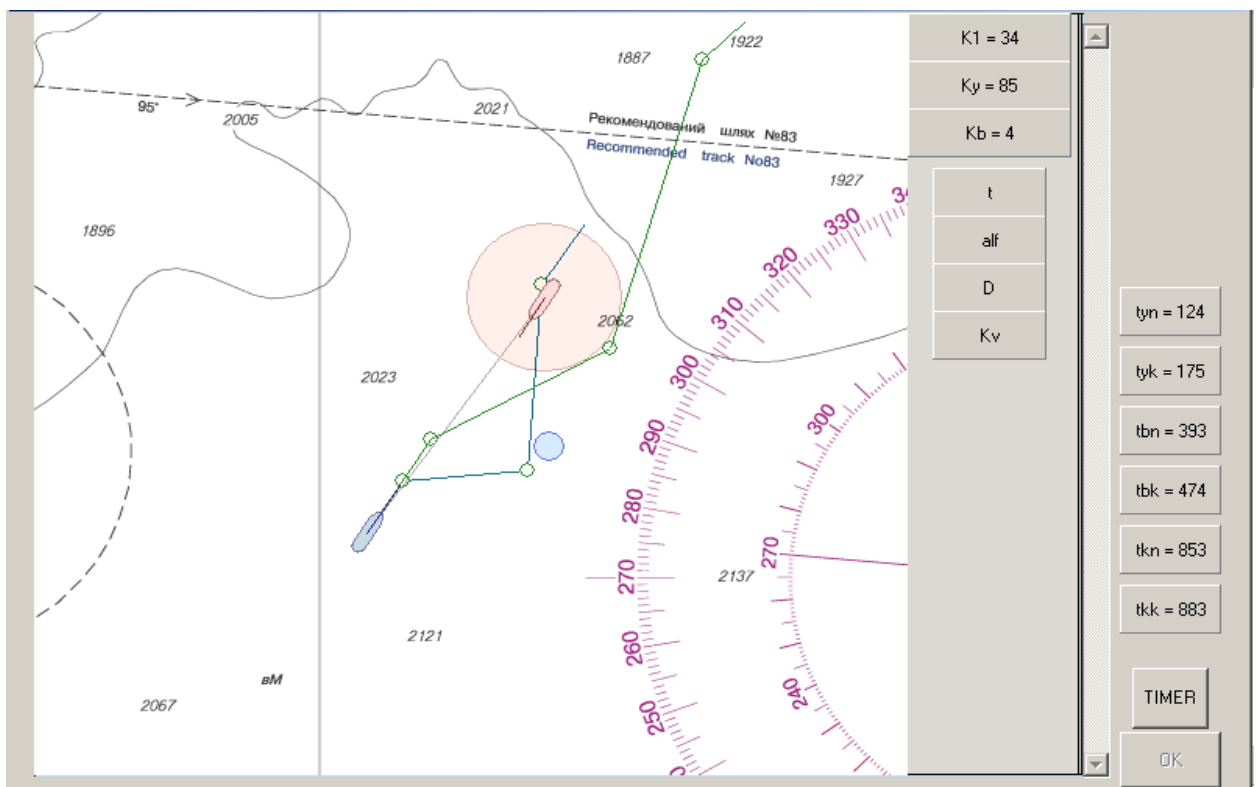


Рисунок 5.48 – Остаточний маневр розходження (ситуація 5)

Імітаційне моделювання маневру розходження в ситуації 5 небезпечного зближення відображено на рисунках 5.49 - 5.51. Момент часу завершення повороту ухилення судна від небезпечної цілі представлено на рисунку 5.49. Процес розходження у момент часу повороту судна на ділянку виходу для повернення на програмну траєкторію руху представлено на рисунку 5.50, а на рисунку 5.51 відображено останній поворот судна на програмну траєкторію руху після завершення маневру розходження.

На рисунку 5.52 представлені області  $Q_{K,ty}$  і  $Q_{K,tb}$  ситуації 1 небезпечного зближення імітаційної програми, яка відображена на рисунку 5.2. Маневр розходження ухиленням управо з параметрами  $t_y = 50$  с і  $K_y = 90^\circ$ , як впливає з рисунка 5.53, є небезпечним і прийнято рішення змінити сторону ухилення маневру розходження (рис. 5.54).

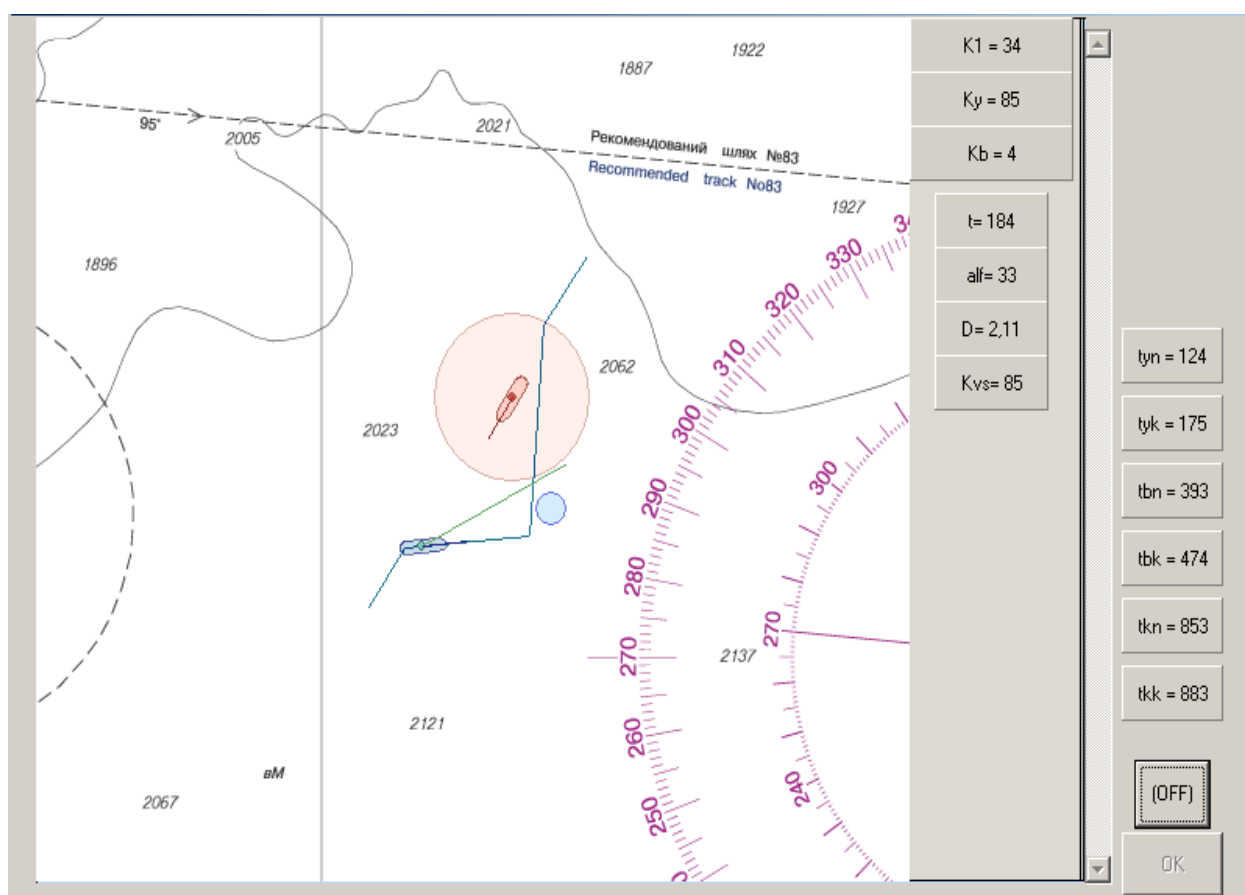


Рисунок 5.49 – Завершення повороту ухилення (ситуація 5)

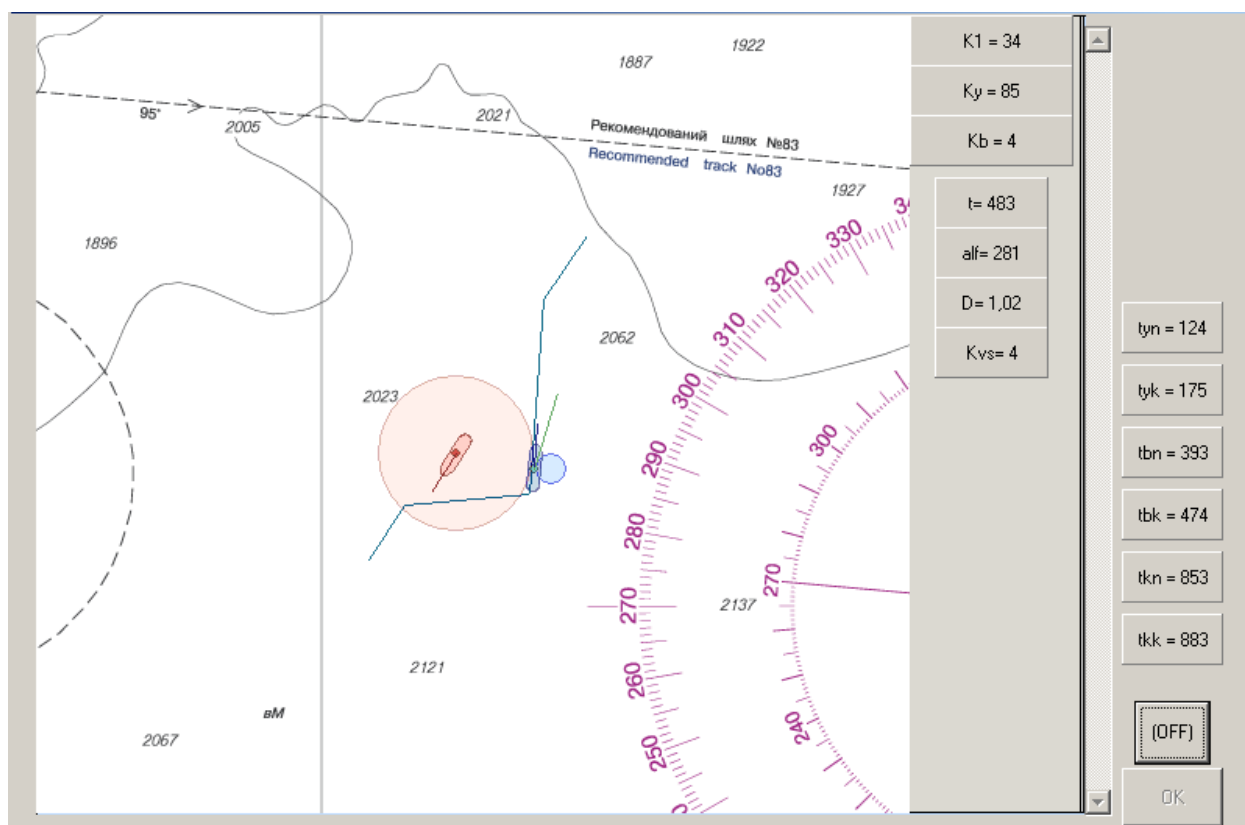


Рисунок 5.50 – Завершення повороту виходу (ситуація 5)

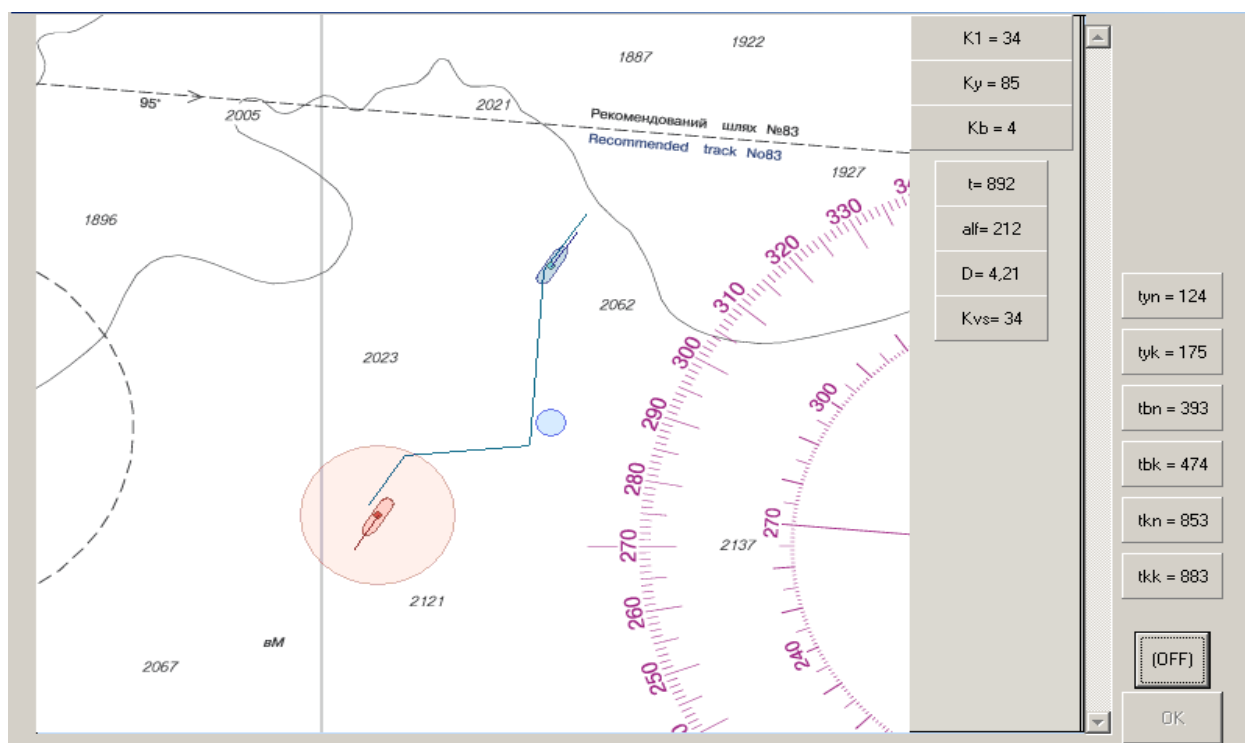


Рисунок 5.51 – Завершення повороту на програмну траєкторію (ситуація 5)

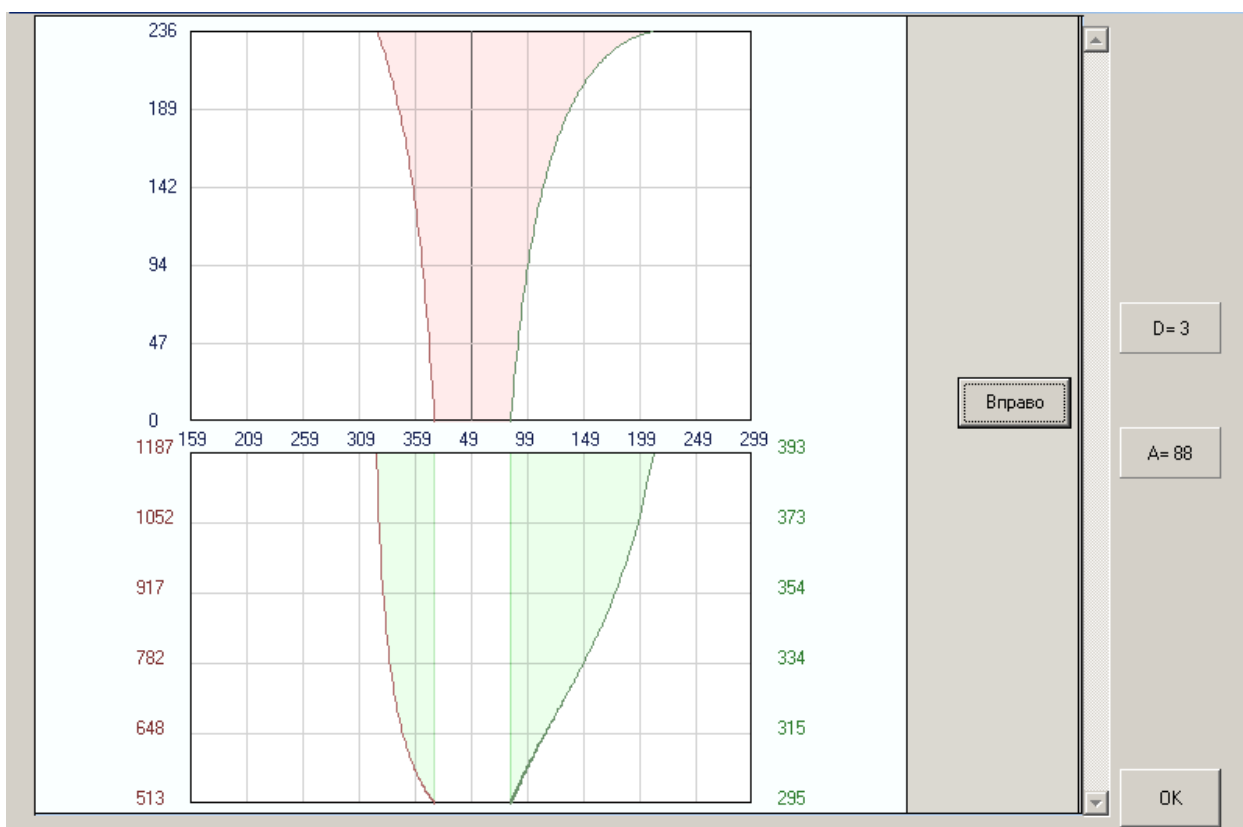


Рисунок 5.52 – Области  $Q_{K,ty}$  і  $Q_{K,tb}$  ситуації 1 небезпечного зближення

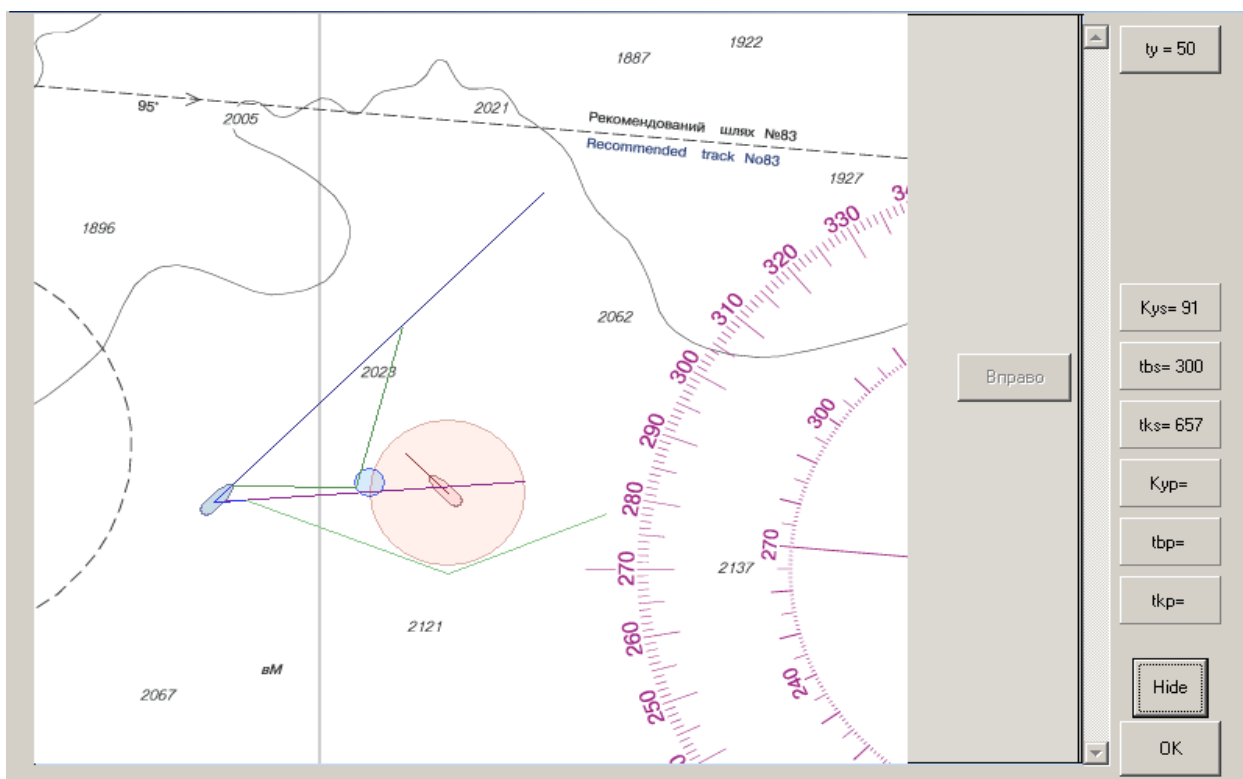


Рисунок 5.53 – Траєкторії розходження під час ухилення судна управо

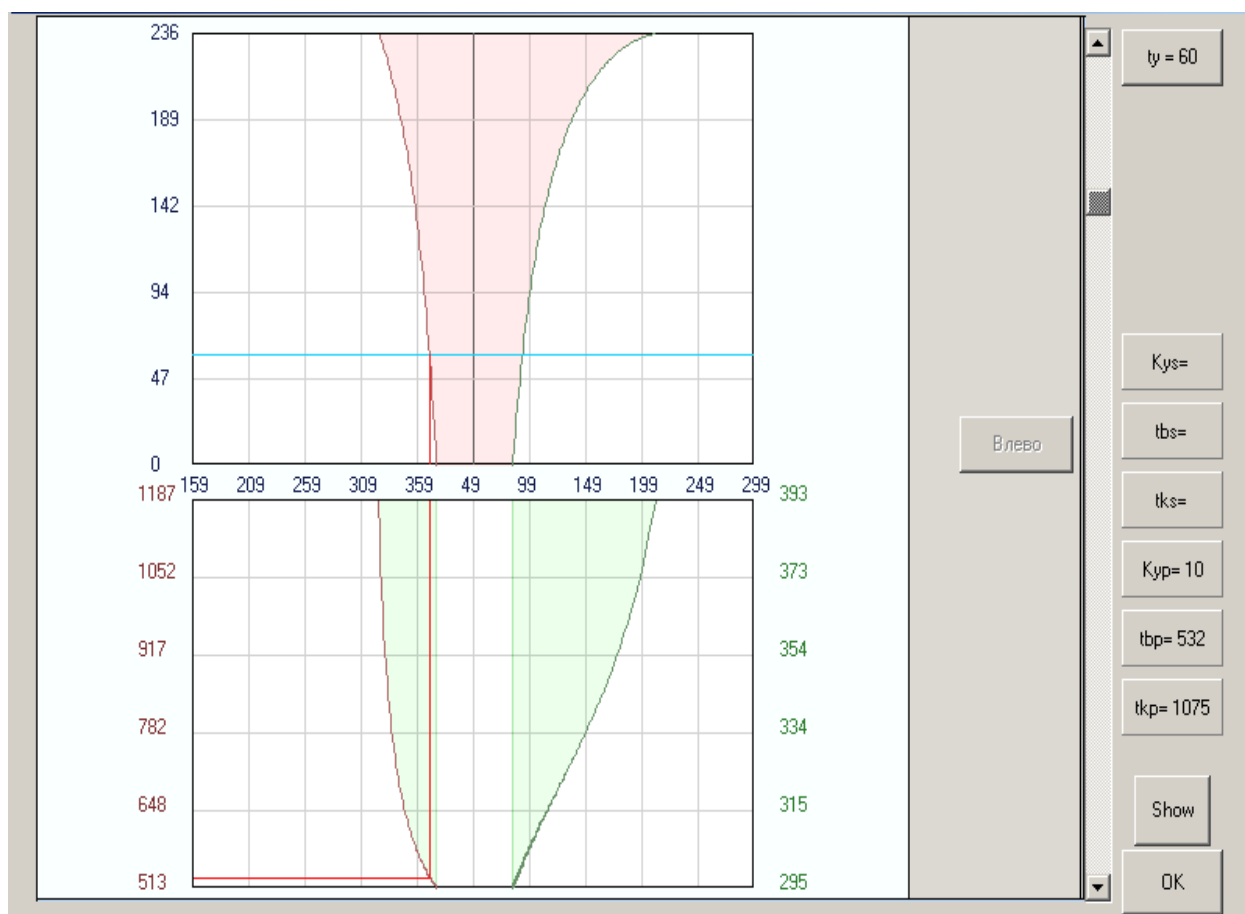


Рисунок 5.54 – Вибір маневру розходження ухиленням вліво

На рисунку 5.55 показані результати перевірки безпеки маневру розходження під час ухилення судна вліво, а безпечний маневр розходження ухиленням вліво в ситуації 1 небезпечного зближення судна з цілю представлено на рисунку 5.56.

Результати імітаційного моделювання маневру розходження ухиленням вліво в ситуації 1 небезпечного зближення представлені на рисунках 5.57 - 5.59. На рисунку 5.57 показано процес розходження у момент часу завершення повороту ухилення судна від небезпечної цілі. Процес розходження у момент часу повороту судна на ділянку виходу для повернення на програмну траєкторію руху представлений на рисунку 5.58, а на рисунку 5.51 відображений поворот судна на програмну траєкторію руху після завершення маневру розходження ухиленням вліво.



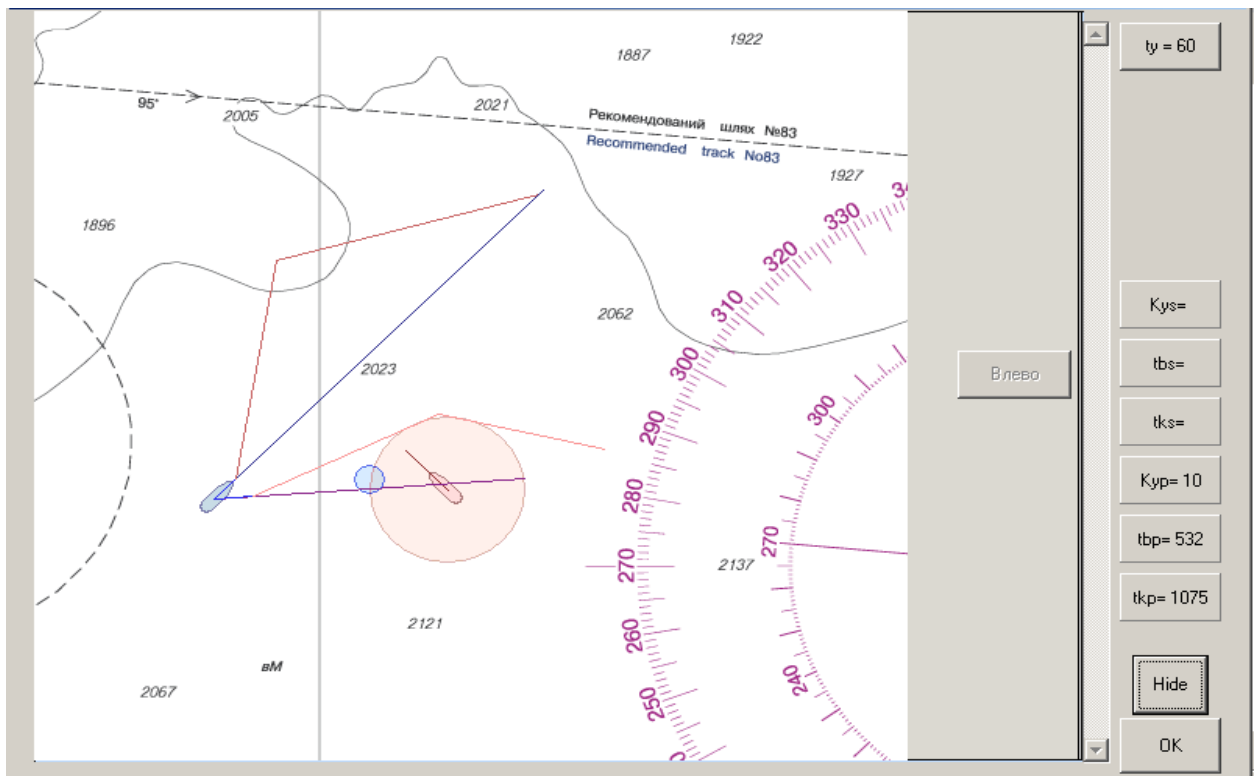


Рисунок 5.55 – Істинна і відносні траєкторії під час ухилення вліво

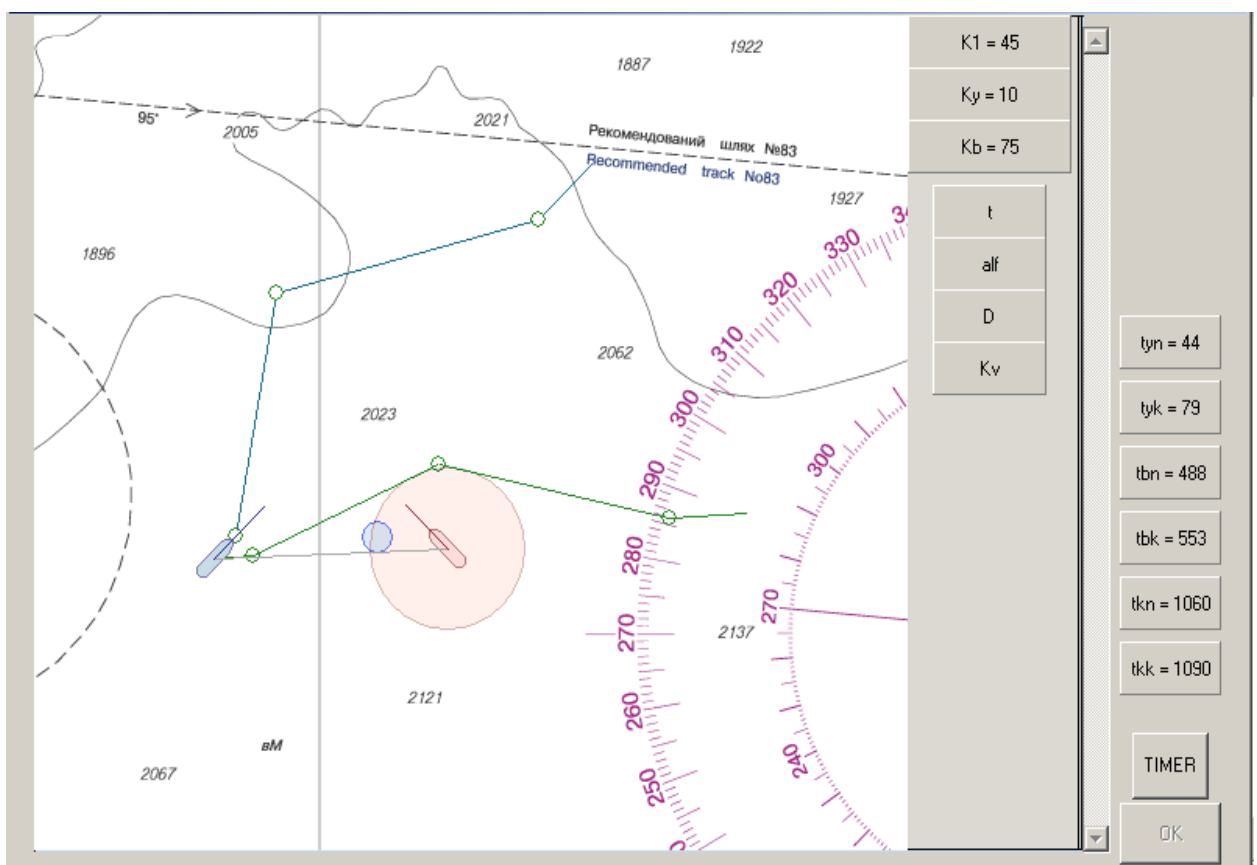


Рисунок 5.56 – Безпечна траєкторія розходження

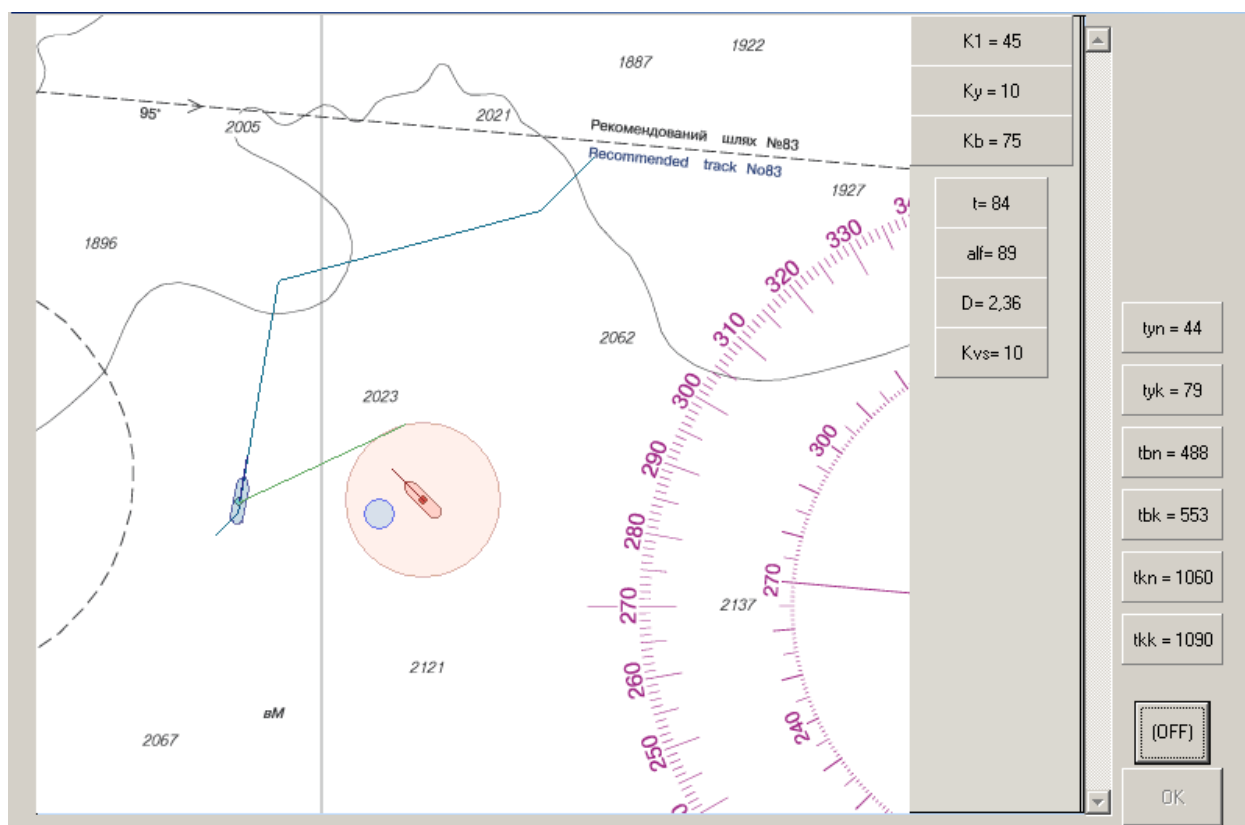


Рисунок 5.57 – Завершення повороту ухилення (ситуація 1)

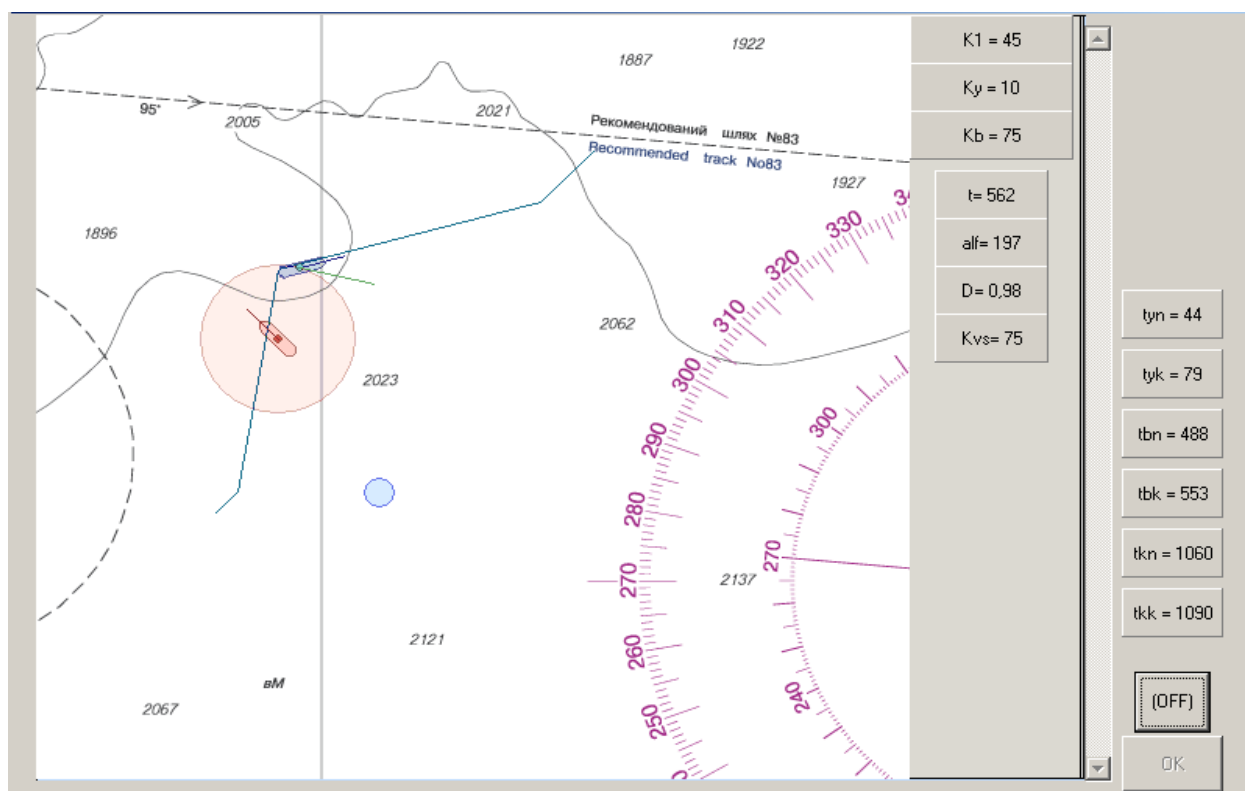


Рисунок 5.58 – Завершення повороту виходу (ситуація 1)

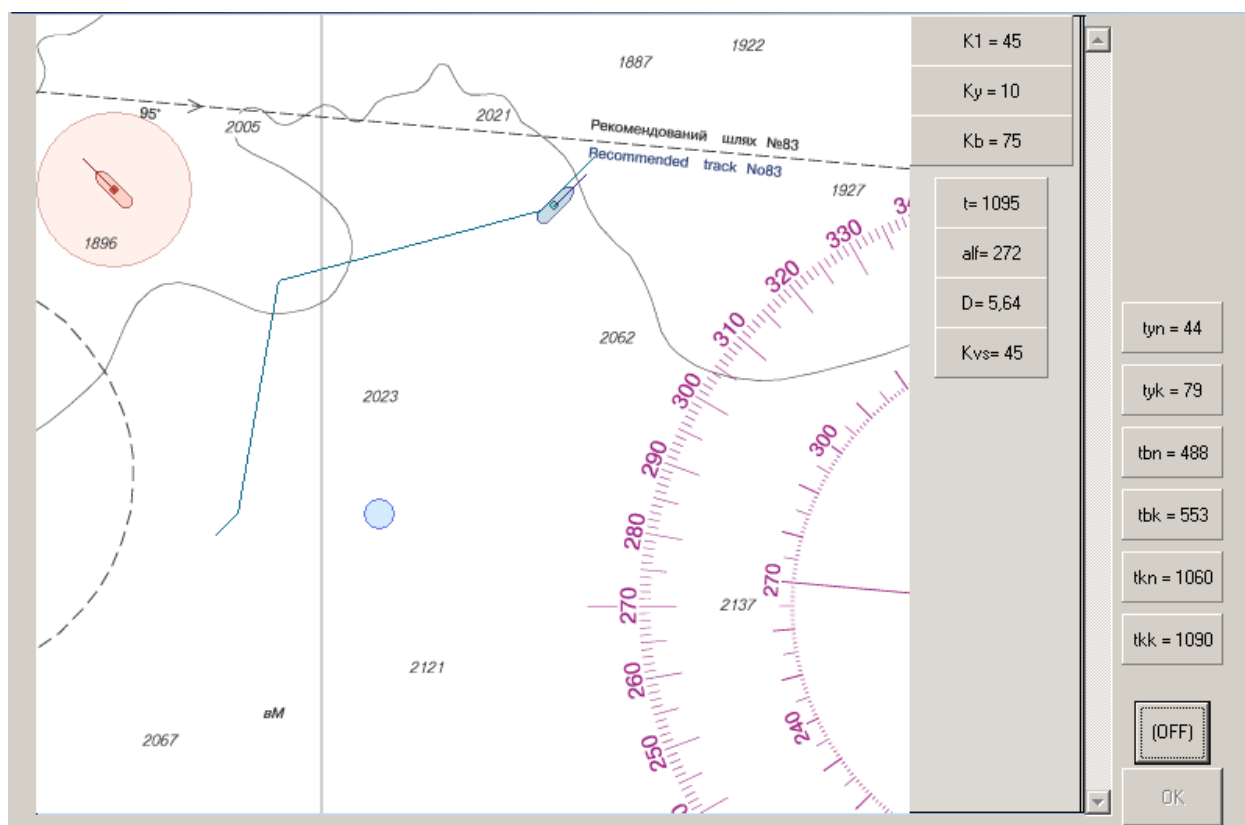


Рисунок 5.59 – Завершення повороту на програмну траєкторію (ситуація 1)

#### 5.4 Висновки за п'ятим розділом

П'ятий розділ присвячений імітаційному моделюванню методу оперативного вибору маневру розходження суден, одержаного в результаті дисертаційного дослідження.

У п'ятому розділі приведено короткий опис програми імітаційного моделювання і показано, що вона складається з трьох модулів: вибору початкової ситуації небезпечного зближення і формування для неї області неприпустимих значень параметрів ухилення  $Q_{K,ty}$  і області  $Q_{K,tb}$  допустимих значень параметрів виходу; модуля визначення оптимальних параметрів розходження судна з відображенням на електронній карті істинної і відносної траєкторій розходження судна; а також модуля імітаційного моделювання процесу розходження судна.

Приведені результати імітаційного моделювання: вибір маневру розходження під час плавання судна у відкритому морі, а також показано урахування навігаційних перешкод під час вибору маневру розходження в стислих районах плавання.

## ВИСНОВКИ

**1. Оцінка стану питання.** Зниження шкоди людському життю, навколишньому середовищу і майну пов'язані із підвищенням безаварійності судноводіння, що являється однією з найважливіших проблем безпеки мореплавання.

Плавання морських суден в умовах обмеженого простору ускладнюють інтенсивне судноплавство і навігаційні небезпеки, які створюють передумови для виникнення аварійних ситуацій. Для стислих районів плавання характерною є швидкоплинна зміна навігаційної ситуації, контроль якої потребує розробки оперативних методів оцінки небезпеки зближення та вибору безпечного маневру розходження, що можливо лише за комп'ютерної реалізації пропонованих методів запобігання зіткнення суден. Тому розробка способів управління суднами в ситуації небезпечного зближення в стислих водах, що є темою даної роботи, являється актуальним і перспективним науковим напрямом.

**2. Формулювання вирішеної наукової задачі, її значення для науки і практики.** В результаті вирішення головної наукової задачі отримано новий метод визначення параметрів маневру розходження судна, що має комп'ютерну реалізацію і відрізняється застосуванням областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

У дисертаційній роботі:

- вперше розроблено спосіб формування областей неприпустимих значень параметрів маневрів ухилення та виходу судна на програмну траєкторію руху;
- вперше запропоновано метод комп'ютерного відображення сформованих областей для вибору з їх допомогою безпечних маневрів розходження;
- вперше отримано процедуру вибору маневру розходження зміною курсу з урахуванням навігаційних перешкод і використанням електронних карт.

**3. Висновки і рекомендації щодо наукового та практичного використання отриманих результатів.** Основні теоретичні і практичні результати, отримані в дисертації, можуть бути упроваджені на судна для попередження зіткнень, а також у використанні розробниками навігаційних інформаційних систем, призначених для розходження судна в ситуаціях небезпечного зближення, та в процесі навчання і підвищення кваліфікації судноводіїв.

**4. Якісні та кількісні показники отриманих результатів.** Якісним показником результатів дисертаційної роботи є можливість підвищення рівня попередження зіткнень суден методами локально - незалежного управління процесу розходження. Кількісним показником являється мінімізація втрат ходового часу на попередження зіткнення та скорочення часу прийняття рішення для вибору маневру розходження.

**5. Обґрунтування достовірності отриманих результатів.**

Достовірність результатів дисертаційної роботи підтверджують обґрунтована розробка математичних моделей та матеріали, одержані під час імітаційного моделювання отриманих теоретичних результатів дослідження.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
2. Демин С.И. Торможение судна / Демин С.И. – М.: Транспорт, 1975. – 81с.
3. Демин С.И. Аналитический метод определения элементов торможения судов / Демин С.И. // Экспресс-информация ЦБНТИ ММФ, серия «Судовождение и связь». – 1980. – № 3 (128). – С. 21-33.
4. Вагущенко Л.Л. Системы автоматического управления движением судна/ Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. - Одесса: Латстар, 2002. - 310 с.
5. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном / Першиц Р.Я. - Л.: Судостроение, 1983.- 272 с.
6. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
7. Мальцев А. С. Управление движением судна / Мальцев А. С. – Одесса: Весть, 1995.- 230 с.
8. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. - 230с.
9. 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.
10. Фрейдзон И.Р. Моделирование корабельных систем управления/ Фрейдзон И.Р. – Л.: Судостроение, 1975. 232 с.
11. 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.

12. Кудряшов В.Е. Математическая модель процесса расхождения нескольких управляемых объектов/ Кудряшов В.Е. // Известия ЛЭТИ. - 1976.- № 206.- С. 15-19.

13. Кудряшов В.Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами/ Кудряшов В.Е. // Судостроение. – 1978. - № 5. – С. 35-40.

14. Сазонов А. Е. Автоматизация судовождения / Сазонов А. Е., Родионов А. А. - М.: Транспорт, 1977. 208 с.

15. Lisovski I. A Differential Game Model of Ship Control Process/ Lisovski I. //Link. Sei. and Appl. Automat. Contr. – Helsinky. – 1978, - Vol.2.- P.1557-1603.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. Павлов В.В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления/ Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1971. - 272 с.

20. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем/ Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1975. - 240 с.

21. 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.



22. Положенцев И.А. Эргатическая дифференциально-игровая система предупреждения столкновения судов/ Положенцев И.А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1980. - № 50. - С. 38-41.

23. Положенцев И.А. Двухступенчатая система предотвращения столкновения судов/ Положенцев И.А. // Автоматика. – 1981. - № 3. - С. 73-76.

24. 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.

25. Богачук Ю.П. Эргатическая система управления групповым движением судов/ Богачук Ю.П., Положенцев И.А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 20-23.

26. Шепетуа Ю.М. Некоторые вопросы постановки задачи синтеза систем управления движением судна в условиях конфликта/ Шепетуа Ю.М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 44-48.

27. 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.

28. Шепетуа Ю. М. Применение комбинированного маневра в эргатических системах разрешения навигационного конфликта / Шепетуа Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1985. - № 68. - С. 45-48.

29. Вычислительная система «Антикон» для предотвращения столкновений судов. А. с. 1136178. СССР. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. - 1985.

30. Павлов В.В. Экспериментальное исследование модели эргатической системы предотвращения столкновений судов / Павлов В.В., Шепетуа Ю. М.: Препр. /АН Украины. Ин-т кибернетики; № 52. – К.: 1985. - 24 с.

31. Положенцев М. А. Применение двухэлементных стратегий расхождения в эргатических системах предупреждения столкновений судов / Положенцев М. А., Шепетуа Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1987. - №76. - С. 19-21.

32. 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.

33. 58 Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов/ Куликов А. М., Поддубный В. В. // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.

34. Поддубный В.В. Метод возможных направлений в задачах безопасного расхождения судов/ Поддубный В.В., Куликов А.А. – М., 1987. – 21 с. – Деп. в ВИНТИ.

35. Степаненко В. В. Формализация контроля текущей ситуации и принятия решений по управлению ею / Степаненко В. В.// Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 177– 185.

36. Степаненко В.В. К вопросу отображения ситуации расхождения судов / Степаненко В.В. // Судовождение. - № 4. - 2002. – С. 101 – 106.

37. Сафин И. В. Условия существования безопасных маневров расхождения / Сафин И. В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 158 – 163.

38. Сафин И.В. Расчет граничных значений параметров множества допустимых маневров расхождения / Сафин И.В. // Судовождение. - №4. - 2002. – С. 95 – 100.

39. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / Сафин И.В. // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.

40. Сафин И.В. Анализ результатов имитационного моделирования процесса расхождения судов / Сафин И.В. // Судовождение. - №6 - 2003. – С. 122-129.

41. Петриченко Е.А. Описание навигационных опасностей в задаче расхождения судов / Петриченко Е.А. // Судовождение. - 2002. - №5. – С. 89- 95.

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. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при расчете момента времени завершения маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. - № 5. - 2002. – С. 13 – 21.

45. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2002. - №4. – С. 32- 36.

46. Бурмака И.А. Расчет длительности поворота судна при расхождении / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств. - 2002. - №7. - С. 3- 6.

47. Бурмака И.А. Применение численных методов для расчета времени начала уклонения судна при расхождении / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2003. - № 6. – С. 27-31.

48. 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.

49. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2005. - № 9. - С. 7-13.

50. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.

51. Мальцев А.С. Выбор оптимального курса для расхождения судов при криволинейном движении / Мальцев А.С., Май Ба Линь // Судовождение. – №7. – 2004. – С. 47-57.

52. Сафин И.В. Оптимизация маневров для безопасного расхождения судов: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16 «Судовождение»/ Сафин И.В. – Одесса, 2004.–23 с.

53. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/ Liu Yu-hong, Hu Shen-ping // Navig. China. 2005, №4, p. 40-45.
54. L. Yongqing. Wuhan ligong daxue xuebao. Jiaotong kexue yu gongcheng ban/ L. Yongqing // J. Wuhan Univ. Technol. Transp. Sci. and Eng. 2004. 28, №5, p. 752-754.
55. 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.
56. 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.
57. 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.
58. 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.
59. Цымбал Н.Н. Перспективные системы предупреждения столкновений судов и принципы их разработки /Цымбал Н.Н.// Материалы I международной научно-практической конференции «Науковий потенціал світу 2004». – том 60. – Днепропетровск. – Наука і освіта, 2004. - С. 44-45.
60. Цымбал Н.Н. Перспективы использования современных технических средств для управления судами в стесненных условиях плавания / Цымбал Н.Н.// V Международная научно-техническая конференция «Гиротехнологии, навигация и управление движением». – Сборник докладов. – Киев. – 2005. – С. 301-304.
61. Цымбал Н.Н. Метод формирования множества безопасных маневров расхождения судов / Цымбал Н.Н. // Тезисы докладов на III международной научно-технической конференции «Живучесть корабля и безопасность на море». – Севастополь. – 2005. - С. 91-94.

62. Цымбал Н.Н. Учет ограничений МППСС-72 при выборе маневра расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С.134 – 138.

63. Hung Iran Viet. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Hung Iran Viet, Hagiwara Hideki, Tamaru Hitoi. // J. Jap. Inst. Navig. 2007. 117, с. 35—42.

64. 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.

65. 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.

66. Бурмака И.А. Определение параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям / Бурмака И.А., Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 19. – Одесса: Феникс, 2011 - С. 24-27.

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.

71. Волков А.Н. Формирование безопасной области в судовых системах навигационной информации / Волков А.Н. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2013. № 4. – С 52 - 56.

72. Волков А.Н. Отображение зоны безопасности судна на электронной карте // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 23. – Одесса: «Изда-тИнформ», 2013. – С 40 - 45.

73. 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.

74. Якушев А.О. Выбор формы безопасной области, обеспечивающей минимальное уклонение судна при расхождении / А.О. Якушев, Э.Н. Пятаков // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – № 187.– С. 77 – 81.

75. 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.

76. 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.

77. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ Бурмака И.А, Булгаков А.Ю. // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № 20.– С. 18 – 23.

78. 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.

79. 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.

80. 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.

81. 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.

82. 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.

83. 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.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.

89. Wawruch R. Study Reliability of the Information About the CPA and TCPA Indicated by the Ship's AIS/ Wawruch R// TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, No. 3, 2016.-



pp. 417-424.

90. 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.

91. Кулаков М. А. Процедура определения маневра расхождения изменением скоростей судов/ Кулаков М. А. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 - С.

92. 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.

93. 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.

94. 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 - 29.

95. Пятаков Э. Н. Разработка системы координации трех судов в ситуации опасного сближения / Пятаков Э. Н., Копанский С. В., Волков Е. Л. // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2016 – Одеса : ОНМА, 2016. – С. 139–141.

96. Копанский С.В. Графический способ оценки значения ситуационного возмущения/ Копанский С.В., Волков Е.Л. // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – № 22.– С. 57-62.

97. Пятаков Э.Н. Координация безопасного расхождения трех судов / Пятаков Э.Н., Копанский С.В., Волков Е.Л. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2016 - С. 185-193.



98. Волков Е.Л. Определение значения ситуационного возмущения с помощью графической диаграммы/ Волков Е.Л.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2017): Матеріали IX Міжнародної наук.-практ. конф., 23-25 травня. 2017 – Херсон: ХДМА, 2017. – С. 98–101.

99. Пятаков Э.Н. Формирование полной стратегии расхождения с учетом требований системы координации взаимодействующих судов/ Пятаков Э.Н., Волков Е.Л. // 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. 27–29.

100. Волков Е.Л. Применение области недопустимых параметров движения для предупреждения столкновения судов / Волков Е.Л., Омельченко Т.Ю. // XXVII Международная конференция «Развитие науки в XXI веке», 15 сентября 2017г. – Харьков – С. 44-49.

101. Волков Е. Л. Способ выбора маневра уклонения судна для безопасного расхождения // Судовождение: Сб. научн. трудов./ НУ «ОМА», Вып. 28. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017 - С.

102. Волков Е. Л. Безопасное расхождение судов маневром уклонения/ Волков Е. Л. // Річковий та морський транспорт: інфраструктура, судноплавство, перевезення, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : ОНМА, 2017. – С.

103. 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.

104. 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.

105. Wielgosz M.: Ship Domain in Open Sea Areas and Restricted Waters: an Analysis of Influence of the Available Maneuvering Area. TransNav, the Interna-

tional Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 1, 2017, pp. 99-104.

106. 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.

107. 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.

108. 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.

109. 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.

110. 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.

111. 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.

112. 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.

113. 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.

114. 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.

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. 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.

117. Волков Е.Л. Выбор маневра расхождения судна изменением курса с помощью области недопустимых параметров движения / Волков Е.Л. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(14), Issue: 132, 2017.- С. 97 - 101.

118. Волков Е.Л. Оперативный способ предупреждения столкновения судов с помощью области недопустимых параметров движения/ Волков Е.Л. // Автоматизация судовых технических средств. – 2017. – № 23. – С. 21-25.

119. Y.L. Volkov. The Choice of the Maneuver of the Vessel's Passing Considering the Coordination's System of the Interactive Vessels and Their Dynamic Characteristics / Y.L. Volkov, E.N. Pyatarov & Y.V.Kalinichenko // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, No. 1, page 79-82, 2017.

120. 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.

121. Петриченко О.А. Оперативный способ определения параметров маневра расхождения судна. / Петриченко О.А.// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018.- С. 68-71.

122. Пятаков Э.Н. Способ расхождения судна с двумя опасными целями последовательными уклонениями / Пятаков Э.Н., Пятаков В.Э., Петриченко О.А. // Austria - science, Issue: 16, 2018.- С. 44-49.

123. Пятаков В.Э. Способ последовательного расхождения судна с двумя опасными целями. / Пятаков В.Э., Петриченко О.А., Калюжный В.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2018. – № 24. – С. 81-87.

124. Петриченко Е.А. Разработка судовой информационной системы предупреждения столкновений./ Петриченко Е.А., Петриченко О.А.// Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2018. - Вып. 28. – С. 120-130.

125. Петриченко О. А Использование областей недопустимых параметров расхождения для предотвращения столкновения судов. / Петриченко О. А.// Austria - science, Issue: 26, 2019.- С. 28-34.

126. Петриченко О.А. Способ оперативного определения параметров маневра расхождения судна. / Петриченко О. А., Цымбал Н.Н.// Austria - science, Issue: 23, 2019.- С. 48 – 53.

127. Петриченко О.А. Предупреждения столкновений с помощью судовой информационной системы. /Петриченко О.А.// Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, автматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – С. 180 – 182.

128. Петриченко О.А. Способ выбора маневра расхождения с помощью электронной карты. / Петриченко О.А.// Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018): Матеріали X Міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня. 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 128–130.

129. Петриченко О.А. Процедура оперативного выбора параметров маневра уклонения судна. /Петриченко О.А. // Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, автматиза-

ція: Матеріали наук.-техн. конф., 15-16 листоп. 2018 – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 232 – 235.

130. 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.

131. Омельченко Т.Ю. Взаимосвязь форм истинной и относительной траекторий расхождения / Омельченко Т.Ю. // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, V(16), Issue: 148, 2017.- С. 82 - 85.

132. Пятаков Э.Н. Развитие теории и методов локально-независимого управления процессом расхождения судов/ Пятаков Э.Н. - Одесса: НУ «ОМА», – 2019. - 318 с.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петриченко О.А. Оперативный способ определения параметров маневра расхождения судна. / Петриченко О.А.// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(22), Issue: 186, 2018.- С. 68-71.
2. Пятаков Э.Н. Способ расхождения судна с двумя опасными целями последовательными уклонениями / Пятаков Э.Н., Пятаков В.Э., Петриченко О.А. // Austria - science, Issue: 16, 2018.- С. 44-49.
3. Пятаков В.Э. Способ последовательного расхождения судна с двумя опасными целями. / Пятаков В.Э., Петриченко О.А., Калюжный В.В. // Автоматизация судовых технических средств. – 2018. – № 24. – С. 81-87.
4. Петриченко Е.А. Разработка судовой информационной системы предупреждения столкновений./ Петриченко Е.А., Петриченко О.А.// Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА, - 2018. - Вып. 28. – С. 120-130.
5. Петриченко О. А Использование областей недопустимых параметров расхождения для предотвращения столкновения судов. / Петриченко О. А.// Austria - science, Issue: 26, 2019.- С. 28-34.
6. Петриченко О.А. Способ оперативного определения параметров маневра расхождения судна. / Петриченко О. А., Цымбал Н.Н.// Austria - science, Issue: 23, 2019.- С. 48 – 53.
7. Петриченко О.А. Предупреждения столкновений с помощью судовой информационной системы. /Петриченко О.А.// Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, автматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 16-17 листоп. 2017 – Одеса : НУ «ОМА», 2017. – С. 180 – 182.
8. Петриченко О.А. Способ выбора маневра расхождения с помощью электронной карты. / Петриченко О.А.// Сучасні інформаційні та інноваційні

технології на транспорті (MINTT-2018): Матеріали X Міжнародної наук.-практ. конф., 29-31 травня. 2018 – Херсон: ХДМА, 2018. – С. 128–130.

9. Петриченко О.А. Процедура оперативного вибору параметрів маневра уклонения судна. /Петриченко О.А. // Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, автматизація: Матеріали наук.-техн. конф., 15-16 листоп. 2018 – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 232 – 235.

Відомості про апробацію результатів дисертації.

Основні результати і положення роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях:

науково-технічна конференція «Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 16-17 листоп. 2017 р.), науково-технічна конференція « Транспортні технології (морський та річковий флот):інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» (Одеса, 15-16 листопаду 2018 р.), X Міжнародна науково - практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2018)» (Херсон, 29-31 травня 2018 р.).

## ФРАГМЕНТ ЛІСТИНГУ ІМІТАЦІЙНОЇ ПРОГРАМИ

```
unit Progett_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;
BPt = array[0..35] of TPoint;

Pt250 = array[0..250] of TPoint;
Pt500 = array[0..501] of TPoint;
Pt251 = array[0..251] of TPoint;
Pt252 = array[0..252] of TPoint;

var
  Form1: TForm1;
  ShowBmp,CargoBmp : 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,
  OkBtn1,OkBtn2 : 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, Dmin35, Dmin45 : real;
```

```
DK1, DK2, DK3, DKm, K1m, K2m, K3m, DKs, K3l, DK1m, DK2m, DK3m, Mn1x, Mn1y : word;
```

```
Msx, Msy, Ms1x, Ms1y, Xmd1, Ymd1 : word;
```

```
Kotys, Kotyp, Kys, Kyp, Koto1, Ky, Koty, Voty, tbmx, Kb, ty, tb, Kotb, Votb, Kbn : real;
```

```
Xyn, Xyk, Xt1, Yt1, Xvs1, Yvs1, cmv, cig : Integer;
```

```
Stb, Stk : BPt;
```

```
tbm, Deltb, Lp, tk, tkmx, tkmn, Deltk, tyd, D12y, alf12y : real;
```

```
Coordst, Coordpt, Coordbs, Coordbp : Pt250;
```

```
dety, Kalf : real;
```

```
Reg : Pt500;
```

```
Regp, Regs : Pt251;
```

```
tbsmn, tbpmn, delts, deltp, Kotbs, Kotbp, tyds, tydp, tbsmn1, tbpmn1 : real;
```

```
Regpy, Regsy : Pt252;
```

```
IndCor, IndT : byte;
```

```
implementation
```

```
{ $R *.DFM }
```

```
uses Unit_2D;
```

```
procedure MakeScale(Lh, Bh, Hh : word; var Lp, Bp, Hp : word; var Scale : real);
```

```
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
          ColorLine(Bmp,Img,728,9+48*i+j,786,9+48*i+j,RGB(30+8*j,40+8*j,70+8*j),1,BmpInd);
          ColorRect(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
              ColorLine(Bmp,Img,666,9+48*i+j,724,9+48*i+j,RGB(30+8*j,40+8*j,70+8*j),1,BmpInd);
              ColorRect(Bmp,Img,667,29+48*i,723,49+48*i,RGB(200,220,240),BmpInd);
            end;
          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
ColorLine(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
ColorLine(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;

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;
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;
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);

```



```

    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;

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;

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,Yk2,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 Ship3(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndCol,Lv,Bv,L1,L2 : byte;
X1,Y1,K1,X2,Y2,K2,X3,Y3,K3 : Integer; V1,V2,V3 : 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,1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1,V1,IndBmp,Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1);
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X2,Y2,K2,V2,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X3,Y3,K3,V3,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,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 Ship4(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndCol,Lv,Bv,L1,L2 : byte;
X1,Y1,K1,X2,Y2,K2,X3,Y3,K3,X4,Y4,K4 : Integer; V1,V2,V3,V4 : 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,1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1,V1,IndBmp,Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1);
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X2,Y2,K2,V2,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X3,Y3,K3,V3,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X4,Y4,K4,V4,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,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 Ship5(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndCol,Lv,Bv,L1,L2 : byte;
X1,Y1,K1,X2,Y2,K2,X3,Y3,K3,X4,Y4,K4,X5,Y5,K5 : Integer;
V1,V2,V3,V4,V5 : 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,1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1,V1,IndBmp,Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1);
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X2,Y2,K2,V2,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X3,Y3,K3,V3,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X4,Y4,K4,V4,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
Vsl(Bmp,Image,0,0,Lv,Bv,L1,L2,X5,Y5,K5,V5,IndBmp,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,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 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;

```



```

begin
ShowBmp := TBitmap.Create;
ShowBmp.Width:=800;
ShowBmp.Height:=600;

CargoBmp := TBitmap.Create;
CargoBmp.Width:=800;
CargoBmp.Height:=430;

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;
{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; ty:=0; IndT:=1;

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,Round(K2),V1,V2,0);

ColorLine>ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xt,Yt,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xvs+Round(5*V1*sin(K1/57.3)),
    Yvs-Round(5*V1*cos(K1/57.3)),RGB(40,40,140),1,0);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xt,Yt,Xt+Round(5*V2*sin(K2/57.3)),
    Yt-Round(5*V2*cos(K2/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

KotVot(Round(K1),Round(K2),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);

ColorLine>ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xvs+Round(200*sin(Kot/57.3)),
    Yvs-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

end;

procedure TForm1.FormDestroy(Sender: TObject);
begin
ShowBmp.Free;
CargoBmp.Free;
end;

procedure TForm1.Image1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
    Y: Integer);

var Str1 : string[4];

begin
with Image1.Canvas do
begin

```

```

ColorRect>ShowBmp,Image1,7,7,35,25,
RGB(230,240,250),0);
Str(X,Str1);
TextOut(10,10,Str1);
ColorRect>ShowBmp,Image1,40,7,68,25,
RGB(230,240,250),0);
Str(Y,Str1);
TextOut(43,10,Str1);
Xcn:=X; Ycn:=Y;
end;
end;

{ SCROLL }

procedure TForm1.ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
var ScrollPos: Integer);

var
StrF,StD,StC: string[3];
Stg : string[5];
StF : string[4];
Xob,Yob,Xn1,Yn1,Yn2 : Integer;
tbs,tbp,Votys,Votyp,Kotyf,Votyf : real;

begin
if IndOK=1 then
begin
ColorRect>ShowBmp,Image1,0,0,672,512,RGB(219,217,209),0);
ColorRect>ShowBmp,Image1,0,0,560,512,RGB(250,255,255),0);
case IndVes of
1: begin
if IndScroll=1 then {alf}
begin
alf:=ScrollPos;
Str(Round(alf),StrF);
Button3.Caption:='A12 = '+StrF;
Panel1.Caption:='A12 = '+StrF;
end;
if IndScroll=2 then {D}
begin
D:=ScrollPos/10;
StrF:=FloatToStr(D);
Button4.Caption:='D12 = '+StrF;
Panel2.Caption:='D12 = '+StrF;
end;
if IndScroll=3 then {K}
begin
if IndK=1 then
begin
K1n:=ScrollPos;
Str(Round(K1n),StrF);
Button5.Caption:='K1 = '+StrF;
Str(K1n,StD);
Str(V1,StC);
Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
end;
if IndK=2 then
begin

```

```

K2n:=ScrollPos;
Str(Round(K2n),StrF);
Button5.Caption:='K2 = '+StrF;
Str(K2n,StD);
Str(V2,StC);
Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
end;
end;
if IndScroll=4 then {V}
begin
if IndV=1 then
begin
V1:=ScrollPos;
Str(Round(V1),StrF);
Button6.Caption:='V1 = '+StrF;
Str(K1,StD);
Str(V1,StC);
Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
end;
if IndV=2 then
begin
V2:=ScrollPos;
Str(Round(V2),StrF);
Button6.Caption:='V2 = '+StrF;
Str(K2,StD);
Str(V2,StC);
Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
end;
end;
end;

```

```

Xt:=280+Round(45*D*sin(alf/57.3));
Yt:=255-Round(45*D*cos(alf/57.3));
Xvs:=280-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(K1n),Xt,Yt,Round(K2n),V1,V2,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xt,Yt,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xvs+Round(5*V1*sin(K1n/57.3)),
Yvs-Round(5*V1*cos(K1n/57.3)),RGB(40,40,140),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xt,Yt,Xt+Round(5*V2*sin(K2n/57.3)),
Yt-Round(5*V2*cos(K2n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

{KotVot(Round(K1),Round(K2),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);}

KotVot(Round(K1n),Round(K2n),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);
Dmin12:=Abs(D*sin((alf-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin12);
Panel20.Caption:='Dmin12 = '+StD;
if Dmin12<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xvs+Round(200{*D}*sin(Kot/57.3)),
Yvs-Round(200{*D}*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,Xvs,Yvs,Xvs+Round(200{*D}*sin(Kot/57.3)),
Yvs-Round(200{*D}*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

```

```

end;
2: begin
  if IndScroll=1 then {alf}
    begin
      case IndA of
        1: begin
          alf12:=ScrollPos;
          Str(Round(alf12),StrF);
          Button3.Caption:='A12 = '+StrF;
          Panel1.Caption:='A12 = '+StrF;
          end;
        2: begin
          alf13:=ScrollPos;
          Str(Round(alf13),StrF);
          Button3.Caption:='A13 = '+StrF;
          Panel3.Caption:='A13 = '+StrF;
          end;
          end;
        end;
      end;

  if IndScroll=2 then {D}
    begin
      case IndD of
        1: begin
          D12:=ScrollPos/10;
          StrF:=FloatToStr(D12);
          Button4.Caption:='D12 = '+StrF;
          Panel2.Caption:='D12 = '+StrF;
          end;
        2: begin
          D13:=ScrollPos/10;
          StrF:=FloatToStr(D13);
          Button4.Caption:='D13 = '+StrF;
          Panel4.Caption:='D13 = '+StrF;
          end;
          end;
        end;
      end;

  if IndScroll=3 then {K}
    begin
      case IndK of
        1: begin
          K1n:=ScrollPos;
          Str(Round(K1n),StrF);
          Button5.Caption:='K1 = '+StrF;
          Str(K1n,StD);
          Str(V1,StC);
          Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
          end;
        2: begin
          K2n:=ScrollPos;
          Str(Round(K2n),StrF);
          Button5.Caption:='K2 = '+StrF;
          Str(K2n,StD);
          Str(V2,StC);
          Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
          end;
      end;
    end;
  end;

```

```

3: begin
  K3n:=ScrollPos;
  Str(Round(K3n),StrF);
  Button5.Caption:='K3 = '+StrF;
  Str(K3n,StD);
  Str(V3,StC);
  Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
end;
end;
end;
if IndScroll=4 then {V}
begin
case IndV of
1: begin
  V1:=ScrollPos;
  Str(Round(V1),StrF);
  Button6.Caption:='V1 = '+StrF;
  Str(K1,StD);
  Str(V1,StC);
  Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
end;
2: begin
  V2:=ScrollPos;
  Str(Round(V2),StrF);
  Button6.Caption:='V2 = '+StrF;
  Str(K2,StD);
  Str(V2,StC);
  Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
end;
3: begin
  V3:=ScrollPos;
  Str(Round(V3),StrF);
  Button6.Caption:='V3 = '+StrF;
  Str(K3,StD);
  Str(V3,StC);
  Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
end;
end;
end;

```

```

X1:=280; Y1:=255;
X2:=280+Round(D12*50*sin(alf12/57.3));
Y2:=255-Round(D12*50*cos(alf12/57.3));
X3:=280+Round(D13*50*sin(alf13/57.3));
Y3:=255-Round(D13*50*cos(alf13/57.3));

```

```
Ship3(ShowBmp,Image1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1n,X2,Y2,K2n,X3,Y3,K3n,V1,V2,V3,0);
```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X2,Y2,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X3,Y3,RGB(100,140,100),1,0);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(100*sin(K1n/57.3)),
  Y1-Round(100*cos(K1n/57.3)),RGB(40,40,140),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X2,Y2,X2+Round(100*sin(K2n/57.3)),
  Y2-Round(100*cos(K2n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,X3,Y3,X3+Round(100*sin(K3n/57.3)),
  Y3-Round(100*cos(K3n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

KotVot(Round(K1n),Round(K2n),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);
Dmin12:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin12);
Panel20.Caption:='Dmin12 = '+StD;
if Dmin12<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
  Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
  Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);
KotVot(Round(K1n),Round(K3n),Round(V1),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin13:=Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3));
{StD:=FloatToStr(Dmin12);
Panel20.Caption:='Dmin12 = '+StD;}
if Dmin13<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
  Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
  Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

alf23:=Pelg(X3-X2,Y2-Y3);
D23:=Distn((X2-280)/50-(X3-280)/50,(Y2-280)/50-(Y3-280)/50);
Str(Round(alf23),StD);
StF:=FloatToStr(D23);;
Panel12.Caption:='A23='+StD+' D23='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K3n),Round(V2),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin23:=Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin23);
Panel21.Caption:='Dmin23 = '+StD;
end;
3: begin
if IndScroll=1 then {alf}
begin
case IndA of
1: begin
alf12:=ScrollPos;
Str(Round(alf12),StrF);
Button3.Caption:='A12 = '+StrF;
Panel1.Caption:='A12 = '+StrF;
end;
2: begin
alf13:=ScrollPos;
Str(Round(alf13),StrF);
Button3.Caption:='A13 = '+StrF;
Panel3.Caption:='A13 = '+StrF;
end;
3: begin
alf14:=ScrollPos;
Str(Round(alf14),StrF);
Button3.Caption:='A14 = '+StrF;
Panel5.Caption:='A14 = '+StrF;
end;

```

```

        end;
    end;

    if IndScroll=2 then {D}
    begin
        case IndD of
        1: begin
            D12:=ScrollPos/10;
            StrF:=FloatToStr(D12);
            Button4.Caption:='D12 = '+StrF;
            Panel2.Caption:='D12 = '+StrF;
            end;
        2: begin
            D13:=ScrollPos/10;
            StrF:=FloatToStr(D13);
            Button4.Caption:='D13 = '+StrF;
            Panel4.Caption:='D13 = '+StrF;
            end;
        3: begin
            D14:=ScrollPos/10;
            StrF:=FloatToStr(D14);
            Button4.Caption:='D14 = '+StrF;
            Panel6.Caption:='D14 = '+StrF;
            end;
        end;
    end;

    if IndScroll=3 then {K}
    begin
        case IndK of
        1: begin
            K1n:=ScrollPos;
            Str(Round(K1n),StrF);
            Button5.Caption:='K1 = '+StrF;
            Str(K1n,StD);
            Str(V1,StC);
            Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
            end;
        2: begin
            K2n:=ScrollPos;
            Str(Round(K2n),StrF);
            Button5.Caption:='K2 = '+StrF;
            Str(K2n,StD);
            Str(V2,StC);
            Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
            end;
        3: begin
            K3n:=ScrollPos;
            Str(Round(K3n),StrF);
            Button5.Caption:='K3 = '+StrF;
            Str(K3n,StD);
            Str(V3,StC);
            Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
            end;
        4: begin
            K4n:=ScrollPos;
            Str(Round(K4n),StrF);

```

```

    Button5.Caption:='K4 = '+StrF;
    Str(K4n,StD);
    Str(V4,StC);
    Panel13.Caption:='4 K4='+StD+' V4='+StC;
    end;
    end;
end;
if IndScroll=4 then {V}
begin
case IndV of
1: begin
    V1:=ScrollPos;
    Str(Round(V1),StrF);
    Button6.Caption:='V1 = '+StrF;
    Str(K1,StD);
    Str(V1,StC);
    Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
    end;
2: begin
    V2:=ScrollPos;
    Str(Round(V2),StrF);
    Button6.Caption:='V2 = '+StrF;
    Str(K2,StD);
    Str(V2,StC);
    Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
    end;
3: begin
    V3:=ScrollPos;
    Str(Round(V3),StrF);
    Button6.Caption:='V3 = '+StrF;
    Str(K3,StD);
    Str(V3,StC);
    Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
    end;
4: begin
    V4:=ScrollPos;
    Str(Round(V4),StrF);
    Button6.Caption:='V4 = '+StrF;
    Str(K4,StD);
    Str(V4,StC);
    Panel13.Caption:='4 K4='+StD+' V4='+StC;
    end;
    end;
end;

X1:=280; Y1:=255;
X2:=280+Round(D12*50*sin(alf12/57.3));
Y2:=255-Round(D12*50*cos(alf12/57.3));
X3:=280+Round(D13*50*sin(alf13/57.3));
Y3:=255-Round(D13*50*cos(alf13/57.3));
X4:=280+Round(D14*50*sin(alf14/57.3));
Y4:=255-Round(D14*50*cos(alf14/57.3));

```

```

Ship4(ShowBmp,Image1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1n,X2,Y2,K2n,X3,Y3,K3n,X4,Y4,K4n,V1,V2,V3,V4,
0);

```



```

ColorLine>ShowBmp,Image1,X1,Y1,X2,Y2,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine>ShowBmp,Image1,X1,Y1,X3,Y3,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine>ShowBmp,Image1,X1,Y1,X4,Y4,RGB(100,140,100),1,0);

ColorLine>ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(100*sin(K1n/57.3)),
    Y1-Round(100*cos(K1n/57.3)),RGB(40,40,140),1,0);
ColorLine>ShowBmp,Image1,X2,Y2,X2+Round(100*sin(K2n/57.3)),
    Y2-Round(100*cos(K2n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine>ShowBmp,Image1,X3,Y3,X3+Round(100*sin(K3n/57.3)),
    Y3-Round(100*cos(K3n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine>ShowBmp,Image1,X4,Y4,X4+Round(100*sin(K4n/57.3)),
    Y4-Round(100*cos(K4n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

KotVot(Round(K1n),Round(K2n),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);
Dmin12:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin12);
Panel20.Caption:='Dmin12 = '+StD;
if Dmin12<=Dd then
ColorLine>ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
    Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine>ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
    Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

KotVot(Round(K1n),Round(K3n),Round(V1),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin13:=Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3));
if Dmin13<=Dd then
ColorLine>ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
    Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine>ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
    Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

KotVot(Round(K1n),Round(K4n),Round(V1),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin14:=Abs(D14*sin((alf14-Kot)/57.3));
if Dmin14<=Dd then
ColorLine>ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
    Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine>ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
    Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

alf23:=Pelg(X3-X2,Y2-Y3);
D23:=Distn((X2-280)/50-(X3-280)/50,(Y2-280)/50-(Y3-280)/50);
Str(Round(alf23),StD);
StF:=FloatToStr(D23);;
Panel12.Caption:='A23='+StD+' D23='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K3n),Round(V2),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin23:=Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin23);
Panel21.Caption:='Dmin23 = '+StD;

alf24:=Pelg(X4-X2,Y2-Y4);
D24:=Distn((X2-280)/50-(X4-280)/50,(Y2-280)/50-(Y4-280)/50);
Str(Round(alf24),StD);

```

```

StF:=FloatToStr(D24);;
Panel14.Caption:='A24='+StD+' D24='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K4n),Round(V2),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin24:=Abs(D24*sin((alf24-Kot)/57.3));

alf34:=Pelg(X4-X3,Y3-Y4);
D34:=Distn((X3-280)/50-(X4-280)/50,(Y3-280)/50-(Y4-280)/50);
Str(Round(alf34),StD);
StF:=FloatToStr(D34);;
Panel15.Caption:='A34='+StD+' D34='+StF;
KotVot(Round(K3n),Round(K4n),Round(V3),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin34:=Abs(D34*sin((alf34-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin34);
Panel22.Caption:='Dmin34 = '+StD;
end;
4: begin
if IndScroll=1 then {alf}
begin
case IndA of
1: begin
alf12:=ScrollPos;
Str(Round(alf12),StrF);
Button3.Caption:='A12 = '+StrF;
Panel1.Caption:='A12 = '+StrF;
end;
2: begin
alf13:=ScrollPos;
Str(Round(alf13),StrF);
Button3.Caption:='A13 = '+StrF;
Panel3.Caption:='A13 = '+StrF;
end;
3: begin
alf14:=ScrollPos;
Str(Round(alf14),StrF);
Button3.Caption:='A14 = '+StrF;
Panel5.Caption:='A14 = '+StrF;
end;
4: begin
alf15:=ScrollPos;
Str(Round(alf15),StrF);
Button3.Caption:='A15 = '+StrF;
Panel7.Caption:='A15 = '+StrF;
end;
end;
end;

if IndScroll=2 then {D}
begin
case IndD of
1: begin
D12:=ScrollPos/10;
StF:=FloatToStr(D12);
Button4.Caption:='D12 = '+StrF;
Panel2.Caption:='D12 = '+StrF;
end;
2: begin

```

```

D13:=ScrollPos/10;
StrF:=FloatToStr(D13);
Button4.Caption:='D13 = '+StrF;
Panel4.Caption:='D13 = '+StrF;
end;
3: begin
D14:=ScrollPos/10;
StrF:=FloatToStr(D14);
Button4.Caption:='D14 = '+StrF;
Panel6.Caption:='D14 = '+StrF;
end;
4: begin
D15:=ScrollPos/10;
StrF:=FloatToStr(D15);
Button4.Caption:='D15 = '+StrF;
Panel8.Caption:='D15 = '+StrF;
end;
end;
if IndScroll=3 then {K}
begin
case IndK of
1: begin
K1n:=ScrollPos;
Str(Round(K1n),StrF);
Button5.Caption:='K1 = '+StrF;
Str(K1n,StD);
Str(V1,StC);
Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
end;
2: begin
K2n:=ScrollPos;
Str(Round(K2n),StrF);
Button5.Caption:='K2 = '+StrF;
Str(K2n,StD);
Str(V2,StC);
Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
end;
3: begin
K3n:=ScrollPos;
Str(Round(K3n),StrF);
Button5.Caption:='K3 = '+StrF;
Str(K3n,StD);
Str(V3,StC);
Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
end;
4: begin
K4n:=ScrollPos;
Str(Round(K4n),StrF);
Button5.Caption:='K4 = '+StrF;
Str(K4n,StD);
Str(V4,StC);
Panel13.Caption:='4 K4='+StD+' V4='+StC;
end;
5: begin
K5n:=ScrollPos;

```

```

    Str(Round(K5n),StrF);
    Button5.Caption:='K5 = '+StrF;
    Str(K5n,StD);
    Str(V5,StC);
    Panel16.Caption:='5 K5='+StD+' V5='+StC;
    end;
    end;
end;
if IndScroll=4 then {V}
begin
case IndV of
1: begin
    V1:=ScrollPos;
    Str(Round(V1),StrF);
    Button6.Caption:='V1 = '+StrF;
    Str(K1,StD);
    Str(V1,StC);
    Panel9.Caption:='1 K1='+StD+' V1='+StC;
    end;
2: begin
    V2:=ScrollPos;
    Str(Round(V2),StrF);
    Button6.Caption:='V2 = '+StrF;
    Str(K2,StD);
    Str(V2,StC);
    Panel10.Caption:='2 K2='+StD+' V2='+StC;
    end;
3: begin
    V3:=ScrollPos;
    Str(Round(V3),StrF);
    Button6.Caption:='V3 = '+StrF;
    Str(K3,StD);
    Str(V3,StC);
    Panel11.Caption:='3 K3='+StD+' V3='+StC;
    end;
4: begin
    V4:=ScrollPos;
    Str(Round(V4),StrF);
    Button6.Caption:='V4 = '+StrF;
    Str(K4,StD);
    Str(V4,StC);
    Panel13.Caption:='4 K4='+StD+' V4='+StC;
    end;
5: begin
    V5:=ScrollPos;
    Str(Round(V5),StrF);
    Button6.Caption:='V5 = '+StrF;
    Str(K5,StD);
    Str(V5,StC);
    Panel16.Caption:='5 K5='+StD+' V5='+StC;
    end;
    end;
end;

```

```

X1:=280; Y1:=255;

```

```

X2:=280+Round(D12*50*sin(alf12/57.3));
Y2:=255-Round(D12*50*cos(alf12/57.3));
X3:=280+Round(D13*50*sin(alf13/57.3));
Y3:=255-Round(D13*50*cos(alf13/57.3));
X4:=280+Round(D14*50*sin(alf14/57.3));
Y4:=255-Round(D14*50*cos(alf14/57.3));
X5:=280+Round(D15*50*sin(alf15/57.3));
Y5:=255-Round(D15*50*cos(alf15/57.3));

Ship5(ShowBmp,Image1,0,Lv,Bv,L1,L2,X1,Y1,K1n,X2,Y2,K2n,X3,Y3,K3n,X4,Y4,K4n,
X5,Y5,K5n,V1,V2,V3,V4,V5,0);

ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X2,Y2,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X3,Y3,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X4,Y4,RGB(100,140,100),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X5,Y5,RGB(100,140,100),1,0);

ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(100*sin(K1n/57.3)),
Y1-Round(100*cos(K1n/57.3)),RGB(40,40,140),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X2,Y2,X2+Round(100*sin(K2n/57.3)),
Y2-Round(100*cos(K2n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X3,Y3,X3+Round(100*sin(K3n/57.3)),
Y3-Round(100*cos(K3n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X4,Y4,X4+Round(100*sin(K4n/57.3)),
Y4-Round(100*cos(K4n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);
ColorLine(ShowBmp,Image1,X5,Y5,X5+Round(100*sin(K5n/57.3)),
Y5-Round(100*cos(K5n/57.3)),RGB(140,40,40),1,0);

KotVot(Round(K1n),Round(K2n),Round(V1),Round(V2),Kot,Vot);
Dmin12:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin12);
Panel20.Caption:='Dmin12 = '+StD;
if Dmin12<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

KotVot(Round(K1n),Round(K3n),Round(V1),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin13:=Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3));
if Dmin13<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

KotVot(Round(K1n),Round(K4n),Round(V1),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin14:=Abs(D14*sin((alf14-Kot)/57.3));
if Dmin14<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

```

```

KotVot(Round(K1n),Round(K5n),Round(V1),Round(V5),Kot,Vot);
Dmin15:=Abs(D15*sin((alf15-Kot)/57.3));
if Dmin15<=Dd then
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
  Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(240,40,40),1,0)
else
ColorLine(ShowBmp,Image1,X1,Y1,X1+Round(200*sin(Kot/57.3)),
  Y1-Round(200*cos(Kot/57.3)),RGB(140,40,140),1,0);

alf23:=Pelg(X3-X2,Y2-Y3);
D23:=Distn((X2-280)/50-(X3-280)/50,(Y2-280)/50-(Y3-280)/50);
Str(Round(alf23),StD);
StF:=FloatToStr(D23);;
Panel12.Caption:='A23='+StD+' D23='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K3n),Round(V2),Round(V3),Kot,Vot);
Dmin23:=Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin23);
Panel21.Caption:='Dmin23 = '+StD;

alf24:=Pelg(X4-X2,Y2-Y4);
D24:=Distn((X2-280)/50-(X4-280)/50,(Y2-280)/50-(Y4-280)/50);
Str(Round(alf24),StD);
StF:=FloatToStr(D24);;
Panel14.Caption:='A24='+StD+' D24='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K4n),Round(V2),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin24:=Abs(D24*sin((alf24-Kot)/57.3));

alf25:=Pelg(X5-X2,Y2-Y5);
D25:=Distn((X2-280)/50-(X5-280)/50,(Y2-280)/50-(Y5-280)/50);
Str(Round(alf25),StD);
StF:=FloatToStr(D25);;
Panel17.Caption:='A25='+StD+' D25='+StF;
KotVot(Round(K2n),Round(K5n),Round(V2),Round(V5),Kot,Vot);
Dmin25:=Abs(D25*sin((alf25-Kot)/57.3));

alf34:=Pelg(X4-X3,Y3-Y4);
D34:=Distn((X3-280)/50-(X4-280)/50,(Y3-280)/50-(Y4-280)/50);
Str(Round(alf34),StD);
StF:=FloatToStr(D34);;
Panel12.Caption:='A34='+StD+' D34='+StF;
KotVot(Round(K3n),Round(K4n),Round(V3),Round(V4),Kot,Vot);
Dmin34:=Abs(D34*sin((alf34-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin34);
Panel22.Caption:='Dmin34 = '+StD;

alf35:=Pelg(X5-X3,Y3-Y5);
D35:=Distn((X3-280)/50-(X5-280)/50,(Y3-280)/50-(Y5-280)/50);
Str(Round(alf35),StD);
StF:=FloatToStr(D35);;
Panel18.Caption:='A35='+StD+' D35='+StF;
KotVot(Round(K3n),Round(K5n),Round(V3),Round(V5),Kot,Vot);
Dmin35:=Abs(D35*sin((alf35-Kot)/57.3));

alf45:=Pelg(X5-X4,Y4-Y5);
D45:=Distn((X4-280)/50-(X5-280)/50,(Y4-280)/50-(Y5-280)/50);

```

```

Str(Round(alf45),StD);
StF:=FloatToStr(D45);;
Panel19.Caption:='A45='+StD+' D45='+StF;
KotVot(Round(K4n),Round(K5n),Round(V4),Round(V5),Kot,Vot);
Dmin45:=Abs(D45*sin((alf45-Kot)/57.3));
StD:=FloatToStr(Dmin45);
Panel23.Caption:='Dmin45 = '+StD;
end;
end; {case}
end;

```

```

if IndOK=2 then

```

```

begin

```

```

case IndVes of

```

```

1: begin

```

```

if IndScroll=1 then

```

```

begin

```

```

ty:=ScrollPos;

```

```

Str(Round(ty),StrF);

```

```

Button3.Caption:='ty = '+StrF;

```

```

end;

```

```

if IndScroll=2 then

```

```

begin

```

```

K2:=ScrollPos;

```

```

Str(Round(K2),StrF);

```

```

Button4.Caption:='K2 = '+StrF;

```

```

end;

```

```

Image1.Canvas.CopyRect(Rect(60,0,520,510),

```

```

ShowBmp.Canvas,Rect(60,0,520,510));

```

```

Kalf:=Cour(Round(alf12+arcsin((V2/V1)*sin((K2-alf12)/57.3))));

```

```

D12y:=Sqrt(Sqr(D12)+Sqr(Vot*ty/3600)-

```

```

2*D12*Vot*ty*cos((alf12-Koto1)/57.3)/3600);

```

```

alf12y:=Koto1+arcsin(Lm/D12y);

```

```

Kotys:=Cour(Round(alf12y+arcsin(Dd/D12y)));

```

```

Kotyp:=Cour(Round(alf12y-arcsin(Dd/D12y)));

```

```

Kys:={ Cour(} Round(Kotys+arcsin((V2/V1)*sin((K2-Kotys)/57.3)));

```

```

Kyp:={ Cour(} Round(Kotyp+arcsin((V2/V1)*sin((K2-Kotyp)/57.3)));

```

```

Xn:=Round(280+0.67*(Kys-Kalf));

```

```

Xn1:=Round(280+0.75*(Kyp-Kalf));

```

```

Yn:=Round(260-ty*1.055);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,Yn,Xn,260,RGB(20,210,20),1,0);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn1,Yn,Xn1,260,RGB(250,20,20),1,0);

```

```

ColorLine(ShowBmp,Image1,100{237},Yn,460{471},Yn,RGB(20,210,250),1,0);

```

```

KotVot(K1,K2,V1,V2,Koto1,Vot);

```

```

KotVot(Round(Kys),K2,V1,V2,Kotyf,Votys);

```

```

KotVot(Round(Kyp),K2,V1,V2,Kotyf,Votyp);

```

```

cmv:={1} -1; Kbn:=Cour(K1-cig*30);

KotVot(Round(Kbn),K2,V1,V2,Kotbs,Votyf);

Kbn:=Cour(K1+cig*30);

KotVot(Round(Kbn),K2,V1,V2,Kotbp,Votyf);

cig:=1;
tbs:=ty+3600*(cig*Dd+Vot*(ty/3600)*sin((Kotbs-Koto1)/57.3)+
D*sin((alf12-Kotbs)/57.3))/(Votys*sin((Kotys-Kotbs)/57.3));
cig:=-1;
tbp:=ty+3600*(cig*Dd+Vot*(ty/3600)*sin((Kotbp-Koto1)/57.3)+
D*sin((alf12-Kotbp)/57.3))/(Votyp*sin((Kotyp-Kotbp)/57.3));

if ty=0 then
begin
tbsmn1:=tbs; tbpmn1:=tbp;
end;

Yn1:=Round(505-2.206*(tbs-tbsmn1));

Yn2:=Round(505-2.206*(tbp-tbpmn1));

ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,Yn1,Xn,280,RGB(20,210,20),1,0);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn1,Yn2,Xn1,280,RGB(250,20,20),1,0);

with Image1.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(20,30,80));
Font.Size:=10;
Brush.Style:=bsClear;
KotVot(K1,K2,V1,V2,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D*sin((alf-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(515,455,'Dmin= '+StF);
end;
if K1>K1n then Str(Abs(K1-K1n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(K1-K1n)),StF);
Panel3.Caption:='DeltK1= '+StF;

if K2>K2n then Str(Abs(K2-K2n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(K2-K2n)),StF);
Panel4.Caption:='DeltK2= '+StF;
end;

2: begin
if IndScroll=1 then
begin
K1:=ScrollPos;
Str(Round(K1),StF);
Button3.Caption:='K1 = '+StF;
end;
if IndScroll=2 then
begin

```



```

K2:=ScrollPos;
Str(Round(K2),StrF);
Button4.Caption:='K2 = '+StrF;
end;
if IndScroll=3 then
begin
K3:=ScrollPos;
Str(Round(K3),StrF);
Button5.Caption:='K3 = '+StrF;
end;

Image1.Canvas.CopyRect(Rect(70,5,670,510),
ShowBmp.Canvas,Rect(70,5,670,510));

Yn:=Round(194-0.5*K1*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,120,Yn,588,Yn,RGB(10,210,10),1,0);
Xn:=Round(412+0.5*K2*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,20,Xn,253,RGB(250,10,10),1,0);
Yn:=Round(430-0.5*K2*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,120,Yn,588,Yn,RGB(250,10,10),1,0);
Xn:=Round(412+0.5*K3*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,253,Xn,488,RGB(10,10,250),1,0);
Xn:=Round(180+0.5*K3*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,20,Xn,253,RGB(10,10,250),1,0);

if K1>180 then
begin
Yn:=Round(253-(K1-180)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,210,150),1,0);
end
else
begin
Yn:=Round(20+(180-K1)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,210,150),1,0);
end;

if K2>180 then
begin
Xn:=Round(353+(K2-180)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,253{371},RGB(250,150,150),1,0);
Yn:=Round(488-(K2-180)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(250,150,150),1,0);
end
else
begin
Xn:=Round(587-(180-K2)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,253{371},RGB(250,150,150),1,0);
Yn:=Round(253+(180-K2)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(250,150,150),1,0);
end;

(*if K3>180 then
begin
Yn:=Round(488-(K3-180)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,150,250),1,0);
end

```

```

else
begin
Yn:=Round(253+(180-K3)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,120{237},Yn,588{471},Yn,RGB(150,150,250),1,0);
end;*)

if K3>180 then
begin
Xn:=Round(120+(K3-180)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,253{371},RGB(150,150,250),1,0);
Xn:=Round(353+(K3-180)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,253{137},Xn,488{371},RGB(150,150,250),1,0);
end
else
begin
Xn:=Round(353-(180-K3)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,20{137},Xn,253{371},RGB(150,150,250),1,0);
Xn:=Round(587-(180-K3)*0.65*0.5);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,253{137},Xn,488{371},RGB(150,150,250),1,0);
end;

with Image1.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(20,30,80));
Font.Size:=10;
Brush.Style:=bsClear;
KotVot(K1,K2,V1,V2,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(361,225,'Dmin12= '+StF);

KotVot(K1,K3,V1,V3,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(130,225,'Dmin13= '+StF);

KotVot(K2,K3,V2,V3,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(361,455,'Dmin23= '+StF);
end;

if K1>K1n then Str(Abs(K1-K1n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(K1-K1n)),StF);
Panel3.Caption:='DeltK1= '+StF;

if K2>K2n then Str(Abs(K2-K2n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(K2-K2n)),StF);
Panel4.Caption:='DeltK2= '+StF;

if K3>K3n then Str(Abs(K3-K3n),StF)
else Str(360-Abs(Cour(K3-K3n)),StF);
Panel5.Caption:='DeltK1= '+StF;

```

```

end;
3: begin
  if IndScroll=1 then
    begin
      K1:=ScrollPos;
      Str(Round(K1),StrF);
      Button3.Caption:='K1 = '+StrF;
    end;
  if IndScroll=2 then
    begin
      K2:=ScrollPos;
      Str(Round(K2),StrF);
      Button4.Caption:='K2 = '+StrF;
    end;
  if IndScroll=3 then
    begin
      K3:=ScrollPos;
      Str(Round(K3),StrF);
      Button5.Caption:='K3 = '+StrF;
    end;
  if IndScroll=4 then
    begin
      K4:=ScrollPos;
      Str(Round(K4),StrF);
      Button6.Caption:='K4 = '+StrF;
    end;

  Image1.Canvas.CopyRect(Rect(45,50,660,460),
  ShowBmp.Canvas,Rect(45,50,660,460));

  Yn:=Round(204-0.423*K1*0.65);
  ColorLine(ShowBmp,Image1,54,Yn,646,Yn,RGB(10,200,10),1,0);
  Xn:=Round(103+0.423*K2*0.65);
  ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,255{452},RGB(250,10,10),1,0);
  Yn:=Round(403-0.423*K2*0.65);
  ColorLine(ShowBmp,Image1,449,Yn,646,Yn,RGB(250,10,10),1,0);
  Xn:=Round(301+0.423*K2*0.65);
  ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,255{57},Xn,452,RGB(10,10,250),1,0);

  Xn:=Round(103+0.423*K3*0.65);
  ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,255,Xn,452,RGB(10,10,250),1,0);

  Xn:=Round(301+0.423*K3*0.65);
  ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(10,10,250),1,0);
  Yn:=Round(403-0.423*K2{K3}*0.65);
  ColorLine(ShowBmp,Image1,54,Yn,251,Yn,RGB(10,10,250),1,0);
  Xn:=Round(499+0.423*K4*0.65);
  ColorLine(ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(250,10,250),1,0);
  Yn:=Round(403-0.423*K4*0.65);
  ColorLine(ShowBmp,Image1,251,Yn,449,Yn,RGB(250,10,250),1,0);

  if K1>180 then
    begin
      Yn:=Round(255-(K1-180)*0.65*0.423);
      ColorLine(ShowBmp,Image1,54,Yn,646,Yn,RGB(150,200,150),1,0);
    end

```

```

else
begin
Yn:=Round(57+(180-K1)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,54,Yn,646,Yn,RGB(150,200,150),1,0);
end;

if K2>180 then
begin
Xn:=Round(53+(K2-180)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(250,150,150),1,0);
Yn:=Round(453-0.423*(K2-180)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,449,Yn,646,Yn,RGB(250,150,150),1,0);
end
else
begin
Xn:=Round(251-(180-K2)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(250,150,150),1,0);
Yn:=Round(256+0.423*(180-K2)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,449,Yn,646,Yn,RGB(250,150,150),1,0);
end;

if K3>180 then
begin
Xn:=Round(251+(K3-180)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(150,150,250),1,0);
Yn:=Round(453-0.423*(K3-180)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,53,Yn,251,Yn,RGB(150,150,250),1,0);
end
else
begin
Xn:=Round(449-(180-K3)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(150,150,250),1,0);
Yn:=Round(256+0.423*(180-K3)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,53,Yn,251,Yn,RGB(150,150,250),1,0);
end;

if K4>180 then
begin
Xn:=Round(449+(K4-180)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(250,150,250),1,0);
Yn:=Round(453-0.423*(K4-180)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,251,Yn,449,Yn,RGB(250,150,250),1,0);
end
else
begin
Xn:=Round(646-(180-K4)*0.65*0.423);
ColorLine>ShowBmp,Image1,Xn,57,Xn,452,RGB(250,150,250),1,0);
Yn:=Round(256+0.423*(180-K4)*0.65);
ColorLine>ShowBmp,Image1,251,Yn,449,Yn,RGB(250,150,250),1,0);
end;

with Image1.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(20,30,80));
Font.Size:=10;
Brush.Style:=bsClear;

```

```

KotVot(K1,K2,V1,V2,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D12*sin((alf12-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(59,232,'Dmin12= '+StF);

```

```

KotVot(K1,K3,V1,V3,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D13*sin((alf13-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(258,232,'Dmin13= '+StF);

```

```

KotVot(K1,K4,V1,V4,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D14*sin((alf14-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(456,232,'Dmin14= '+StF);

```

```

KotVot(K3,K2,V3,V2,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D23*sin((alf23-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(59,428,'Dmin23= '+StF);

```

```

KotVot(K3,K4,V3,V4,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D34*sin((alf34-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(258,428,'Dmin34= '+StF);

```

```

KotVot(K2,K4,V2,V4,Kot,Vot);
Lm:=Abs(D24*sin((alf24-Kot)/57.3));
StF:=FloatToStr(Lm);
TextOut(456,428,'Dmin24= '+StF);

```

```

end;

```

```

end;

```

```

end;      { case }

```

```

end;

```

```

end;

```

## ДОДАТОК В.

## АКТИ УПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ



# А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня кандидата наук Петриченко Ольги Олександрівни на тему «Розробка методу оперативного вибору маневру розходження суден при плаванні в стислих водах» у навчальному процесі Херсонської державної морської академії.

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Струмінська Л. Ю., декан факультету судноводіння Нагрибельний Я. А. і завідуючий кафедрою судноводіння та електронних навігаційних систем к. т. н., доцент Крапивко Г.І. склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача наукового ступеня Петриченко Ольги Олександрівни на тему «Розробка методу оперативного вибору маневру розходження суден при плаванні в стислих водах» впроваджені у навчальний процес Херсонської державної академії в дисциплінах на кафедрі судноводіння та електронних навігаційних систем в розділах забезпечення безпеки маневрування судном.

Начальник навчального  
відділу

Струмінська Л. Ю.

Декан факультету судноводіння

Нагрибельний Я. А.

Звідуючий кафедрою судноводіння  
та електронних навігаційних систем  
к. т. н., доцент

Крапивко Г.І.

## АКТ УПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом підтверджується, що в компанії ДП «СМА ШІПС УКРАЇНА» одержав упровадження в учбовий процес метод відображення навігаційної ситуації на електронній карті, який розроблений в дисертаційній роботі Петриченко Ольги Олександрівни на тему „Розробка методу оперативного вибору маневру розходження суден при плаванні в стислих водах”.

Вищезазначений метод відображення навігаційної ситуації на електронній карті входить до навчальної програми перепідготовки старшого командного складу компанії.

Директор ДП «СМА ШІПС Україна»



Тюпиков Є.С.

«10» Лютого 2020г.



## АКТ УПРОВАДЖЕННЯ

Цим актом підтверджується, що в компанії ДП «СМА ШПС УКРАЇНА» одержав упровадження в учбовий процес метод відображення навігаційної ситуації на електронній карті, який розроблений в дисертаційній роботі Петриченко Ольги Олександрівни на тему „Розробка методу оперативного вибору маневру розходження суден при плаванні в стислих водах”.

Вищезазначений метод відображення навігаційної ситуації на електронній карті входить до навчальної програми перепідготовки старшого командного складу компанії.

Директор ДП «СМА ШПС Україна»



Тюпиков Є.Є.

«10» лютого 2020 г.