

AUTOMATIC METHOD DETERMINATION OF PARAMETERS STRATEGY OF DIVERGENCE OF VESSELS BY THEIR COURSES CHANGE

СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРАТЕГИИ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ ИЗМЕНЕНИЕМ ИХ КУРСОВ

D.B. Fedorov, PhD student
Д.Б. Федоров, аспирант

National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine
Национальный университет «Одесская морская академия», Украина

ABSTRACT

In the publication is specified, that providing of safe divergence of vessels at sailing in the straitened waters is one of most the issue of the day of accident-free of navigation. Therefore, straitened districts of sailing with especially intensive motion for the control of process of navigation by the stations of traffic control of vessels which for providing of safe divergence of vessels must dispose by modern facilities of warning of collision of vessels, reducing influencing of human factor of operator by the use of methods of automatic determination of strategy of divergence of vessels at their external management. Actuality of development of method of automatic determination of parameters of strategy of divergence of vessels by the change of their courses is determined to these.

The analysis of the last achievements and publications is resulted in work, the decision of the considered problem and selection of parts unsolved before is begun in which. It is shown that for the decision of problem of warning of collisions of vessels was used method of nonlinear integral invariance, methods of theory of optimum discrete processes, and also methods of differential game theory. The method of warning of collision of vessels by displacement on a line parallel of way of ship and method of flexible strategies of divergence of vessels got development, allowing to form optimum strategy of divergence of ship with a few dangerous targets taking into account substantial factors.

The publication contains analytical dependence of values of courses of deviation of vessels providing their divergence on minimum - possible distance of rapprochement, without taking into account inertia. It is specified, that for optimum of maneuver of divergence is needed, that increases of courses and were minimum, and as the criterion of optimum the sum of their squares is chosen.

It is shown that without taking into account inertia of ship at a turn distance of the shortest rapprochement appears less minimum-possible distance on a size which depends on the increase of relative coordinates of vessels in times of turn and relative course of their deviation.

Procedure of progressive approximations is offered for the calculation of courses of deviation of vessels taking into account their inertia and the algorithm of calculation of course of deviation is represented. Set by the values by the increases of courses from -60° to 60° , the courses of deviation of the second ship settle accounts, which the courses of deviation of the first ship taking into account the dynamics of vessels and increase of his course are determined on. Every maneuver of divergence is characterized by the criterion of optimum, thus the maneuver of divergence gets out as optimum, at which the criterion of optimum is minimum.

A situation is resulted in the publication, for which the computer imitation program expected the optimum courses of deviation of vessels. By the computer program, playing of maneuver of divergence of vessels with the got courses of deviation was produced.

Keywords: safety of navigation, warning of collision of vessels, external process of divergence control, automatic determination of parameters of strategy of divergence.

РЕФЕРАТ

У публікації вказується, що забезпечення безпечного розходження суден при плаванні в стислих водах є однією з найактуальніших проблем безаварійності судноводіння. Тому стислі райони плавання з особливо інтенсивним рухом для контролю процесу судноводіння облаштовуються станціями управління рухом суден, які для забезпечення безпечного розходження суден повинні мати в своєму розпорядженні сучасні засоби попередження зіткнення суден, які знижують впливи людського чинника оператора використанням способів автоматичного визначення стратегії розходження суден при їх зовнішньому управлінні. Цим визначається актуальність розробки способу автоматичного визначення параметрів стратегії розходження суден зміною їх курсів.

У роботі приведено аналіз останніх досягнень і публікацій, в яких почато рішення розглянутої проблеми і виділення невирішених раніше частин. Показано, що для вирішення проблеми попередження зіткнень суден використовуються метод нелінійної інтегральної інваріантності, методи теорії оптимальних дискретних процесів, а також методи теорії диференціальних ігор. Одержали розвиток метод попередження зіткнення суден шляхом зсуву на лінію паралельну шляху судна і метод гнучких стратегій розходження суден, який дозволяє формувати оптимальну стратегію розходження судна з декількома небезпечними цілями з урахуванням істотних чинників.

Публікація містить аналітичну залежність значень курсів ухилення суден, що забезпечують їх розходження на гранично - допустимій дистанції зближення, без урахування інерційності. Вказується, що для оптимальності маневру розходження необхідне, щоб прирости їх курсів були мінімальними, а як критерій оптимальності вибрана сума їх квадратів.

Показано, що без урахування інерційності судна при повороті дистанція найкоротшого зближення виявляється менше гранично - допустимої дистанції на величину, яка залежить від приросту відносних координат суден за час повороту і відносного курсу їх ухилення.

Запропонована процедура послідовних наближень для розрахунку курсів ухилення суден з урахуванням їх інерційності і представлено алгоритм розрахунку курсу ухилення. Задаючись значеннями приростів курсів від

-60° до 60° , розраховуються курси ухилення другого судна, по яких визначаються курси ухилення першого судна з урахуванням динаміки суден і приросту його курсу. Кожен маневр розходження характеризується критерієм оптимальності, причому як оптимальний вибирається маневр розходження, у якого критерій оптимальності є мінімальним.

У публікації приведена ситуація, для якої комп'ютерною імітаційною програмою були розраховані оптимальні курси ухилення суден. За допомогою комп'ютерної програми проводилося програвання маневру розходження суден з одержаними курсами ухилення.

Ключові слова: безпека судноводіння, попередження зіткнення суден, зовнішнє управління процесом розходження, автоматичне визначення параметрів стратегії розходження.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Обеспечение безопасного расхождения судов при плавании в стесненных водах является одной из наиболее актуальных проблем безаварийности судовождения. Поэтому для контроля процесса судовождения стесненные районы плавания с особенно интенсивным движением оборудуются станциями управления движением судов (СУДС). Для обеспечения безопасного расхождения судов СУДС должны располагать современными средствами предупреждения столкновения судов, которые для снижения влияния человеческого фактора оператора должны использовать способы автоматического определения стратегии расхождения судов при их внешнем управлении. Поэтому разработка способа автоматического определения параметров стратегии расхождения судов изменением их

курсов, чему посвящена настоящая статья, является актуальным и перспективным направлением.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Метод нелинейной интегральной инвариантности предлагается использовать в работе [1] для описания взаимодействия судов при расхождении.

Для описания процесса расхождения в работе [2] используются методы теории оптимальных дискретных процессов, а в работах [3,4] производится формализация взаимодействия судов при расхождении методами теории дифференциальных игр.

Формализация взаимодействия судов при возникновении угрозы столкновения рассмотрена в работе [5], в которой также предложено аналитическое описание МППСС-72. Монография [6] посвящена особенностям расхождения судов, в которой приведен метод предупреждения столкновения судов путем смещения на линию параллельную пути судна. В работе [7] рассмотрено внешнее управление тремя судами для безопасного расхождения.

В работе [8] подробно исследована проблема предупреждения столкновений судов и предложен метод гибких стратегий их расхождения, позволяющий формировать оптимальную стратегию расхождения судна с несколькими опасными целями с учетом существенных факторов.

Работа [9] рассматривает выбор ситуации сближения судна с целью из множества стандартных ситуаций, после чего производится определение стратегии расхождения.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Целью статьи является разработка способа автоматического определения параметров стратегии расхождения судов изменением их курсов.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Как показано в работе [10], без учета инерционности судна значения курсов уклонения, обеспечивающих расхождение судов на предельно - допустимой дистанции сближения D_d , в случае $V_1 \neq V_2$ определяются следующей аналитической зависимостью:

$$K_1 = \gamma + \arcsin\{\rho[\sin(K_2 - \gamma)]\}, \quad (1)$$

где $\gamma = \alpha \pm \arcsin \frac{D_d}{D}$.

Если же $V_1 = V_2$, то

$$K_1 = \pi + 2\gamma - K_2. \quad (2)$$

Для безопасного расхождения судов необходимо изменить начальные курсы судов на величины ΔK_1 , ΔK_2 таким образом, чтобы их курсы уклонения $K_{y1} = K_1 + \Delta K_1$ и $K_{y2} = K_2 + \Delta K_2$ удовлетворяли уравнению (1), причем изменение одного из курсов может быть равным нулю. Для оптимальности маневра расхождения необходимо, чтобы приращения курсов ΔK_1 и ΔK_2 были минимальными и удовлетворяли соотношению $(\Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) \rightarrow \min$.

Без учета инерционности судна при повороте дистанция кратчайшего сближения оказывается меньше предельно-допустимой дистанции D_d на величину ΔD_d , которая, как показано в работе [10], определяется выражением:

$$\Delta D_d = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2} \sin(K_{oty}^* - \arctg \frac{\Delta x_{ot}}{\Delta y_{ot}}), \quad (3)$$

где Δx_{ot} и Δy_{ot} - приращения относительных координат за время поворота судов; K_{oty}^* - относительный курс их уклонения.

Если рассматривать криволинейное движение судов в первом приближении, то считаем, что они поворачиваются с постоянными угловыми скоростями $a_{\omega 1}$ и $a_{\omega 2}$, а приращения координат Δx_{ot} и Δy_{ot} в относительном движении можно найти из следующих соображений.

Приращения координат Δx_1 и Δy_1 первого судна за время поворота:

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

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

Изменение координат второго судна Δx_2 и Δy_2 за время поворота:

$$\Delta x_2 = \frac{V_2}{a_{\omega 2}} (\cos K_{2o} - \cos K_{2y}),$$

$$\Delta y_2 = \frac{V_2}{a_{\omega 2}} (\sin K_{2y} - \sin K_{2o}).$$

С учетом полученных выражений Δx_1 , Δy_1 , Δx_2 и Δy_2 , а также учитывая, что

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

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

приращения координат Δx_{ot} и Δy_{ot} принимают следующий вид:

$$\Delta x_{ot} = \frac{V_1}{a_{\omega 1}} (\cos K_{1o} - \cos K_{1y}) - \frac{V_2}{a_{\omega 2}} (\cos K_{2o} - \cos K_{2y}),$$

$$\Delta y_{ot} = \frac{V_1}{a_{\omega 1}} (\sin K_{1y} - \sin K_{1o}) - \frac{V_2}{a_{\omega 2}} (\sin K_{2y} - \sin K_{2o}),$$

где первая составляющая - криволинейное движение первого судна при повороте, а вторая составляющая - криволинейное движение второго судна.

Таким образом, для учета инерционности судна при повороте необходимо определить в первом приближении курс уклонения судна и рассчитать приращение ΔD_d предельно - допустимой дистанции, причем предельно-допустимую дистанцию D_d необходимо увеличить на величину приращения дистанции ΔD_d . В этом случае зависимость (1) принимает вид:

$$K_1 = \alpha \pm \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{D} + \arcsin \left\{ \arcsin(K_2 - \alpha \mp \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{D_{ij}}) \right\}. \quad (4)$$

В частном случае при равенстве скоростей обеих судов $V_1 = V_2$ расчет курса первого судна производится с помощью зависимости:

$$K_1 = \pi + 2[\alpha - \arcsin(\frac{D_d + \Delta D_d}{D})] - K_2. \quad (5)$$

Рассмотрим процедуру учета инерционности судов при расчете курса уклонения K_{1y} по заданному курсу K_{2y} .

Для курса K_{1y} , полученного по заданному курсу K_{2y} , с помощью выражения (1) или (2), находим приращения курсов судов относительно их начальных значений $\Delta K_1 = K_{1y} - K_{1o}$ и $\Delta K_2 = K_{2y} - K_{2o}$, по которым определяем приращение координат $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2$ и Δy_2 обоих судов за время их поворотов с учетом динамической модели их вращательного движения. Затем рассчитываются приращения относительных координат $\Delta x_{от}, \Delta y_{от}$ и с помощью выражения (3) вычисляется первое приближение $\Delta D_d^{(1)}$ значения искомого приращения дистанции ΔD_d . Затем полученное значение $\Delta D_d^{(1)}$ подставляем в формулу (4) или (5) и получаем уточненное значение $K_{1y}^{(1)}$. Находим приращение координаты $\Delta K_1^{(1)} = K_{1y}^{(1)} - K_{1o}$, а затем по описанному алгоритму находим второе приближение приращения $\Delta D_d^{(2)}$, только при расчете относительного курса уклонения $K_{отy}^*$ вместо предельно-допустимой дистанции D_d берем сумму $D_d + \Delta D_d^{(1)}$. Указанная процедура последовательных приближений производится до тех пор, пока разница приращений $\Delta D_d^{(n)} - \Delta D_d^{(n-1)}$ не окажется равной или меньше заданной величины δD . После этого рассчитывается курс уклонения $K_{1y} = K_{1y}^{(n)}$, соответствующий предельно-допустимой дистанции $D_d + \Delta D_d^{(n)}$.

На рис. 1 представлен алгоритм расчета курса уклонения K_{1y} с учетом инерционности судов при повороте.

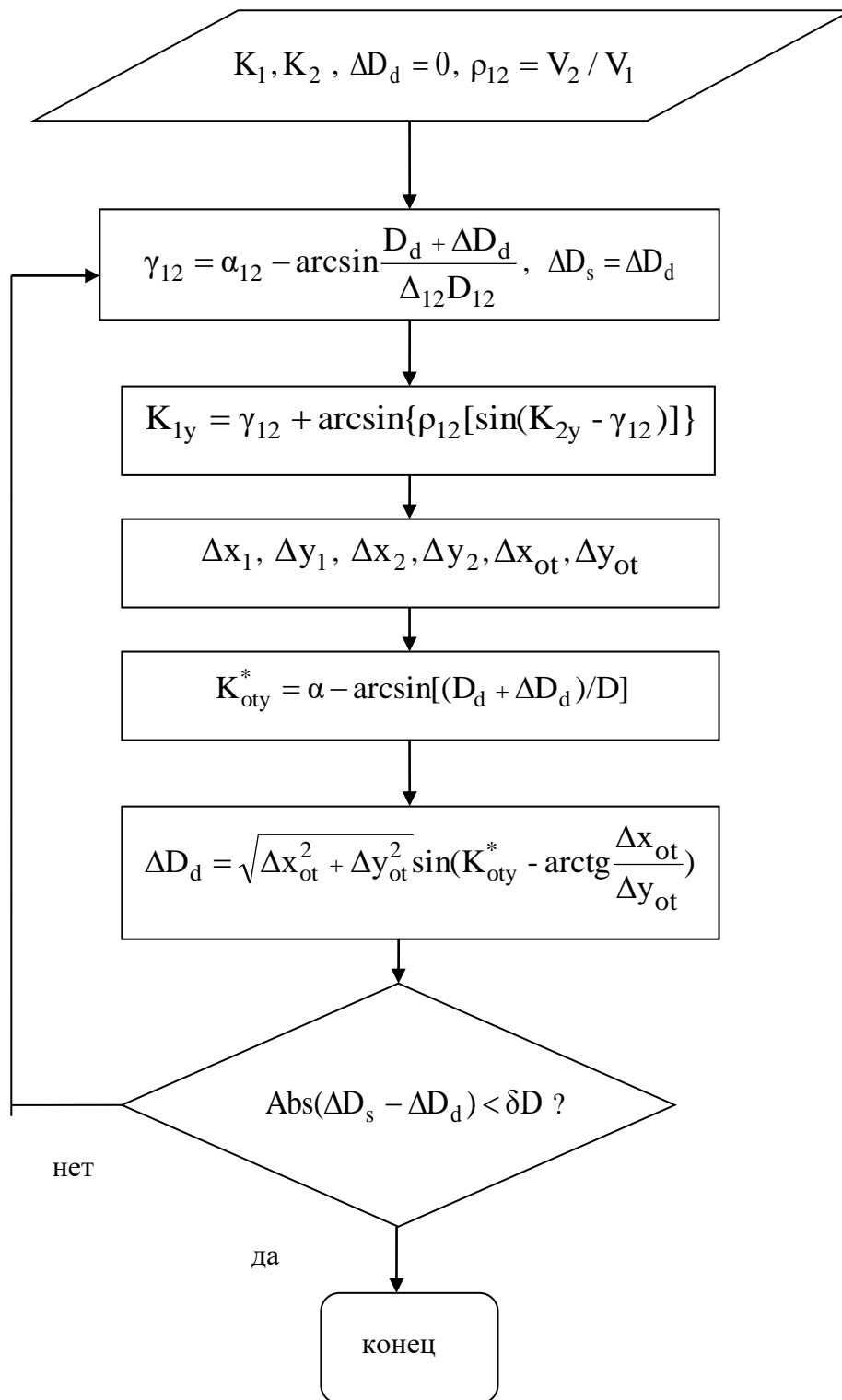


Рис. 1. Алгоритм расчета курса уклонения K_{1y}

Задаваясь значениями ΔK_2 от -60° до 60° , рассчитываются курсы уклонения второго судна K_{2y} , по которым определяются курсы уклонения первого судна K_{1y} с учетом динамики судов и приращения его курса ΔK_1 . Каждый маневр расхождения (K_{1y}, K_{2y})

характеризується критерієм оптимальності $Q = \Delta K_1^2 + \Delta K_2^2$. Оптимальним буде маневр розходження, у якого $Q = \min$.

В якості прикладу була розглянута наступна ситуація небезпечного зближення судів, параметри якої і положення судів показані на рис. 2.

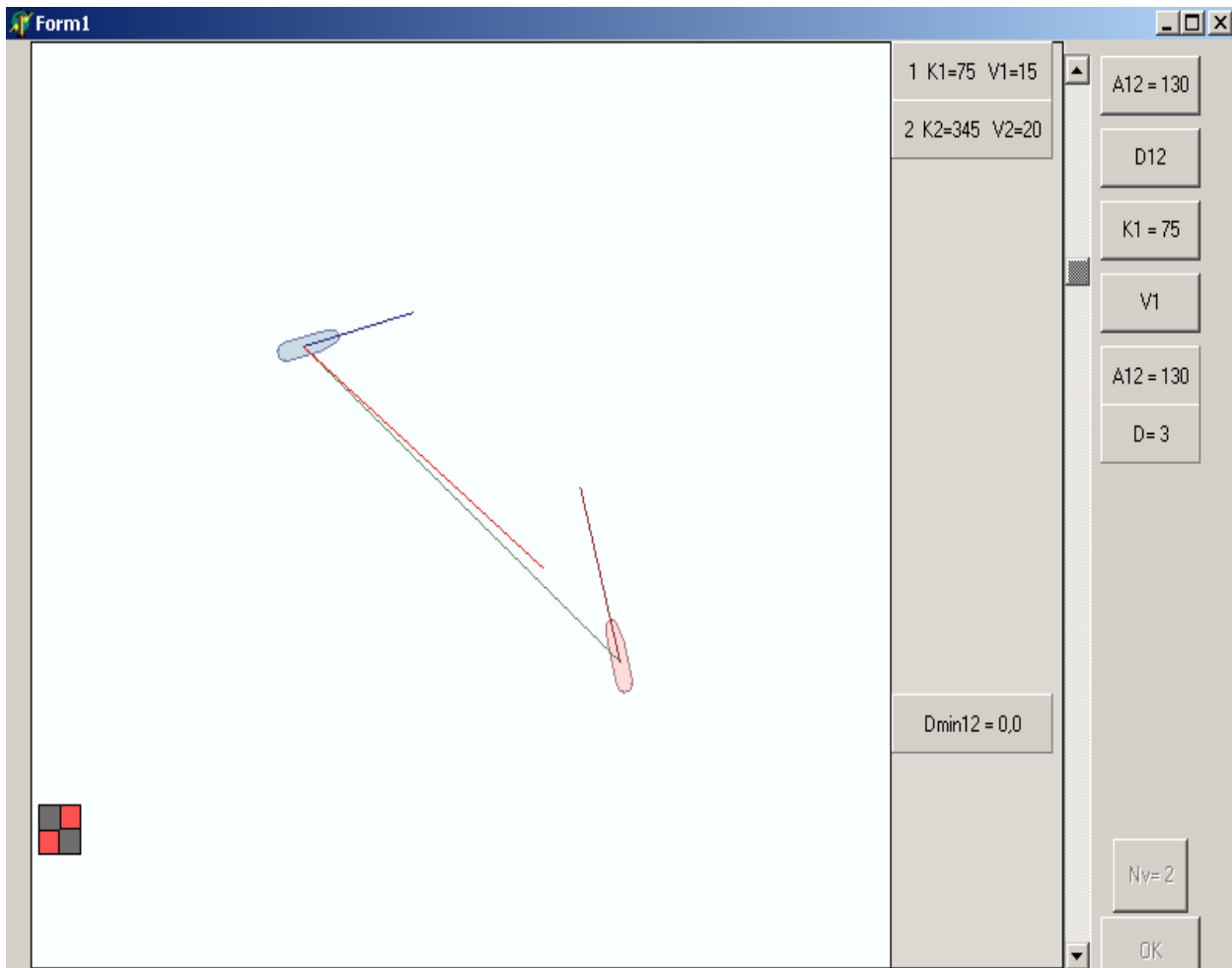


Рис.2. Ситуація небезпечного зближення судів

Для приведеної ситуації комп'ютерною імітаційною програмою були розраховані оптимальні курси ухилу судів $K_{1y} = 54^\circ$ і $K_{2y} = 329^\circ$, які забезпечують розходження в межах допустимої дистанції зближення при мінімальних відхиленнях судів від програмних курсів руху. З допомогою комп'ютерної програми проводилось програвання маневру розходження судів з отриманими курсами ухилу. На рис. 3 показана ситуація початку маневру розходження на 3 с після початку, а на рис. 4 - найкоротше зближення судів на 405 с. З рис. 4 випливає, що дистанція найкоротшого зближення судів дорівнює допустимій дистанції (в наведеному прикладі 1 миля).

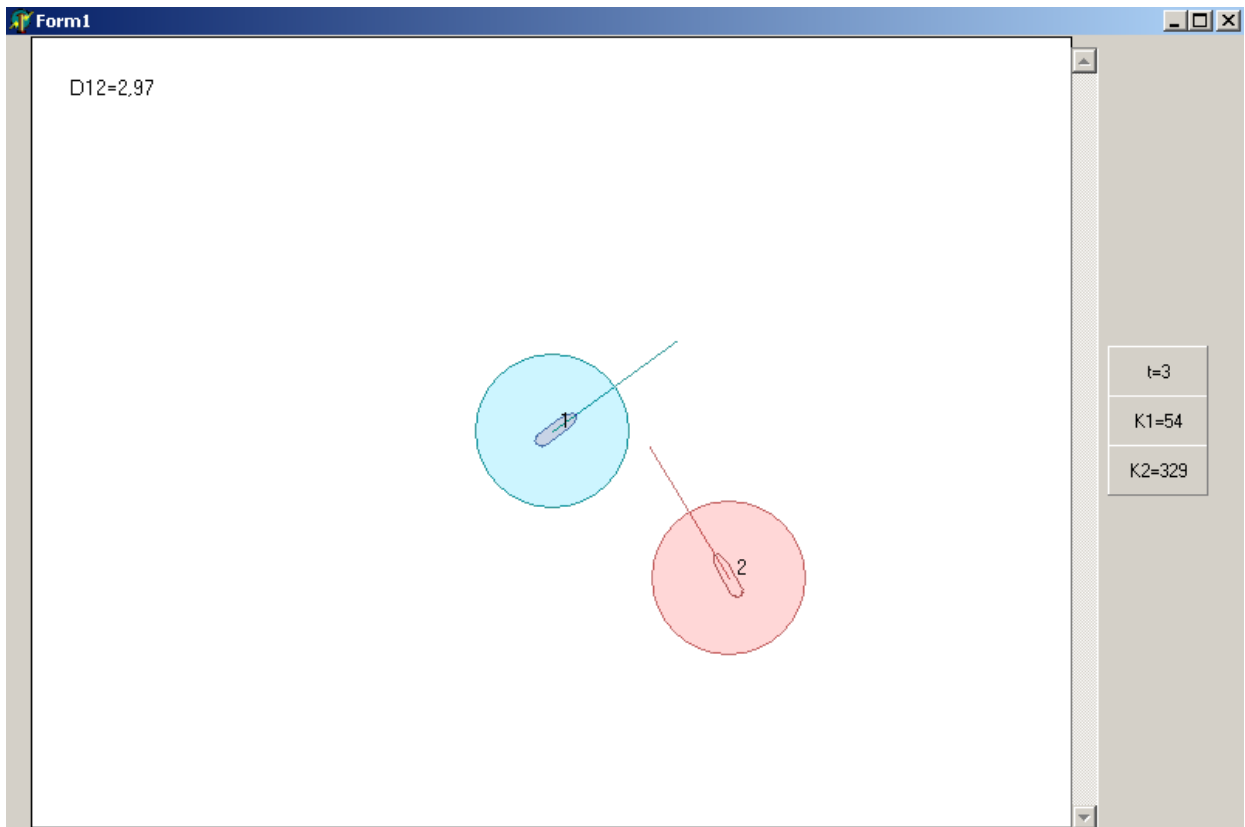


Рис.3. Начало маневра расхождения

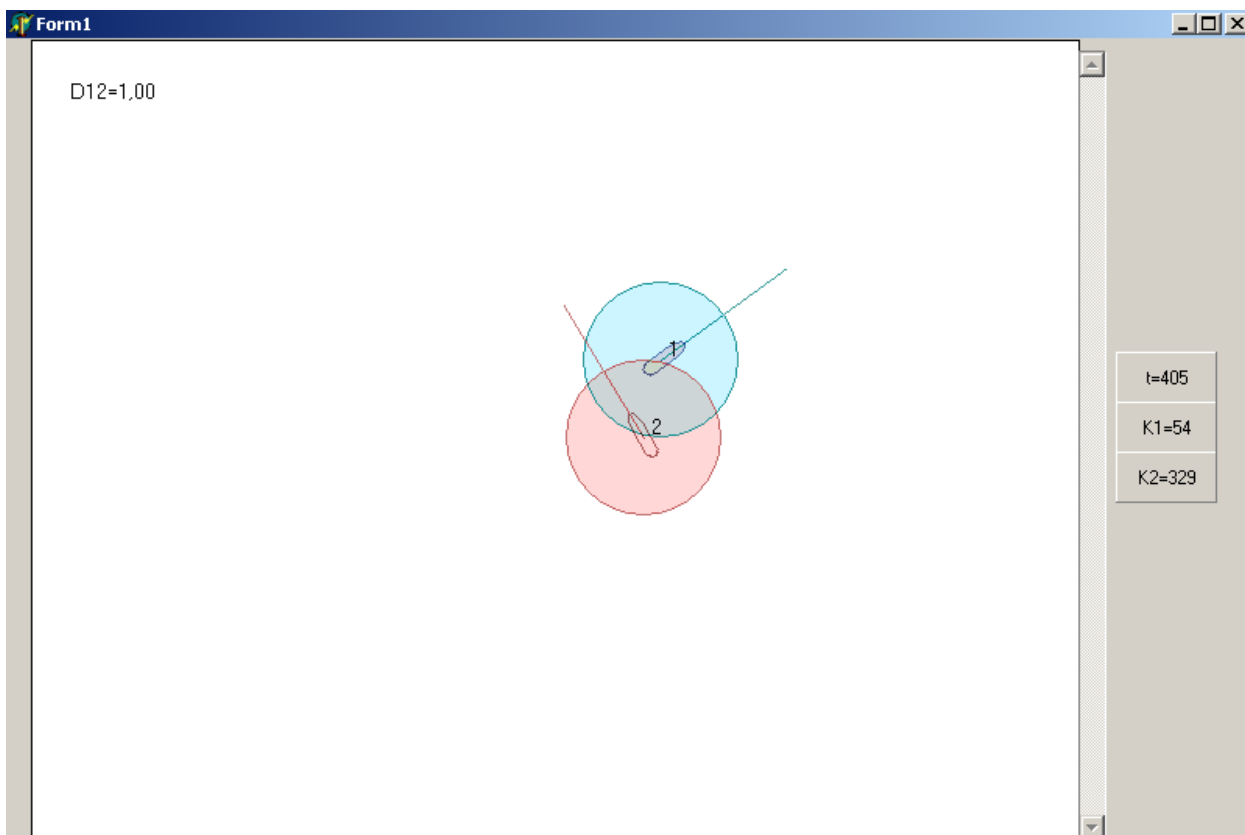


Рис. 4. Ситуация кратчайшего сближения судов

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

Таким образом, в данной статье рассмотрена разработка способа автоматического определения параметров стратегии расхождения судов изменением их курсов. В дальнейшем целесообразно рассмотреть возможность автоматического определения параметров стратегии расхождения судов изменением их скоростей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов В.В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов/ В.В. Павлов, Н.И. Сеньшин // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. - № 68. - С. 43-45.
2. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.
3. Lisowski J. Dynamic games methods in navigation decision support system for safety navigation/ Lisowski J. // Advances in Safety and Reliability. – 2005. - Vol. 2. - London-Singapore, Balkema Publishers. – P. 1285-1292.
4. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / В. Е. Кудряшов // Судостроение. – 1978.- №5. – С. 35-40.
5. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э.Н. Пятаков, Р.Ю. Бужбеецкий, И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков – Херсон: Гринь Д.С., 2015.-312 с.
6. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
7. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. - С. 18 -23.
8. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
9. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / А.С. Мальцев, Е.Е. Тюпиков, И.И. Ворохобин – Одесса: Морской тренажерный центр, 2013. – 304 с.
10. Калиниченко Г. Е. Формирование области опасных курсов судов с учетом их динамических характеристик/ Калиниченко Г.Е., Пасечнюк С.С. // Автоматизация судовых технических средств. – 2017. – № 23 – С. 44-51.