

УДК 656.61.052.484

DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.80-88

## ACCOUNT DYNAMICS OF SHIPS AT THE AUTOMATIC CHOICE OF MANOEUVRE OF DIVERGENCE BY DEVIATION OF ONE SHIP AND BY THE PASSIVE BRAKING OF THE OTHER

### УЧЕТ ДИНАМИКИ СУДОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ ВЫБОРЕ МАНЕВРА РАСХОЖДЕНИЯ УКЛОНЕНИЕМ ОДНОГО СУДНА И ПАССИВНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ ДРУГОГО

**I. A. Burmaka**, DSc, associate professor, **I.I. Vorokhobin**, DSc, associate professor, **D.B. Fedorov**, PhD student

**И.А. Бурмака**, д.т.н., доцент, **И.И. Ворохобин**, к.т.н., доцент, **Д.Б. Федоров**, аспирант

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

#### ABSTRACT

*How is specified in the publication, one of the most actual problems of accident-free of navigation is providing of safe divergence of ships at sailing in the compressed waters. On this reason the compressed districts of sailing with intensive motion of ships have the stations of traffic control of ships for the control of process of navigation, which must dispose by modern facilities of warning of collision of ships for providing of their safe divergence. Thus such facilities are to reduce negative influence of human factor of operator on estimation of situation of rapprochement and choice of maneuver of divergence by the use of methods of automatic determination of strategy of divergence of ships at their external management. This determines actuality of development of method of automatic determination of parameters of strategy of divergence of ships by the change of their courses.*

*The analysis of the last achievements and publications is resulted in work, in which the decision of the considered problem and selection of unsolved is begun before parts. It is shown that for the decision of problem of warning of collisions of ships the method of divergence by a change on a line parallel of way of ship and method of flexible strategies of divergence of ships, which allows to form optimum strategy of divergence of ship with a few dangerous targets taking into account substantial factors, is developed. Strategy of urgent divergence is considered at surplus rapprochement of ships.*

*In the publication the algorithm of automatic determination of optimum maneuver of divergence by deviation of one ship and by the u passive braking of other is described taking into account the dynamics of ships. Thus for the first ship the model of turning with permanent angular speed is used, by which is determined increase of coordinates of ship in times of a turn. The dynamics of the second ship is taken into account by his inertia-brake descriptions.*

*The choice of course of deviation of the first ship and speed of the passive braking of the second ship settle accounts so that their divergence on distance of the shortest rapprochement is provided - possible distance of rapprochement.*

*In quality the criterion of optimum work of increase of course of the first ship is chosen on the increase of speed of the second ship, which for the optimum maneuver of divergence is to be minimum.*

*Analytical expressions which determine the model of turning of the first ship with permanent angular speed and dependence of time of process and the distance passed for this time in the case of the use of the passive braking by the second ship are resulted in work.*

*In the publication in quality an example the resulted situation of dangerous rapprochement of two ships, for which the computer imitation program expected the optimum parameters of maneuver of divergence by deviation of the first ship and passive braking of the second ship. The*

*computer program conducted the imitation design of process of divergence of ships with the got parameters of divergence which confirmed correctness of the offered method of automatic determination of optimum maneuver.*

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

## РЕФЕРАТ

*Як вказується у публікації, однією з найактуальніших проблем безаварійності судноводіння є забезпечення безпечного розходження суден при плаванні в стислих водах. По цій причині стислі райони плавання з інтенсивним рухом суден облаштовуються станціями управління рухом суден для контролю процесу судноводіння, які повинні мати в своєму розпорядженні сучасні засоби попередження зіткнення суден для забезпечення їх безпечного розходження. Причому такі засоби мають знижувати негативний вплив людського чинника оператора на оцінку ситуації зближення і вибір маневру розходження використанням методів 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 розроблено метод розходження 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. Розглянуто стратегію екстреного розходження при надмірному зближенні суден.*

*В публікації описано алгоритм автоматичного визначення оптимального маневру розходження ухиленням одного судна и пасивним гальмуванням іншого з урахуванням динаміки суден. Причому для першого судна використовується модель поворотності з постійною кутковою швидкістю, за допомогою якої визначаються приріст координат судна за час повороту. Динаміка другого судна враховується його інерційно-гальмівними характеристиками.*

*Вибір курсу ухилення першого судна та швидкість пасивного гальмування другого судна розраховуються таким чином, що забезпечують їх розходження на дистанції найкоротшого зближення, яка дорівнює гранично - допустимій дистанції зближення.*

*В якості критерію оптимальності вибрано добуток приросту курсу першого судна на приріст швидкості другого судна, який для оптимального маневру розходження має бути мінімальним.*

*В роботі приведено аналітичні вирази, які визначають модель поворотності першого судна з постійною кутковою швидкістю і залежність часу перехідного процесу та пройденої за цей час відстані в разі використання пасивного гальмування другим судном.*

*У публікації в якості прикладу наведена ситуація небезпечного зближення двох суден, для якої комп'ютерною імітаційною програмою були розраховані оптимальні параметри маневру розходження ухиленням першого судна та пасивним гальмуванням другого судна. Комп'ютерною програмою проводилося імітаційне моделювання процесу розходження суден з одержаними параметрами розходження, яке підтвердило коректність запропонованого методу автоматичного визначення оптимального маневру.*

**Ключові слова:** безпека мореплавання, методи попередження зіткнення суден, зовнішнє управління процесом розходження, автоматичне визначення параметрів маневру розходження.

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

Особенностями стесненных вод являются наличие навигационных опасностей и интенсивное движение судов, которые ведут к росту риска возникновения аварий судов. Поэтому подходы ко многим портам и транзитным районам интенсивного судоходства оборудуются системами управления движением судов (СУДС), которые обеспечивают безопасность судоходства, предупреждая возможные столкновения судов при их опасном сближении, чем вызвана необходимость разработки методов внешнего управления процессом расхождения судов.

Ситуация опасного сближения судов может быть усугублена субъективностью оператора СУДС при оценке ситуаций сближения и принятия решений по предупреждению столкновения, поэтому для снижения влияния человеческого фактора при выборе маневра расхождения целесообразным является автоматизация определения его параметров, чему посвящена данная публикация.

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

Метод формирования гибких стратегий расхождения предложен в работе [1], а работа [2] посвящена взаимодействию судов в ситуации их опасного сближения, которое определяется уровнем угрозы столкновения, и выбору стратегии расхождения для предупреждения их столкновения.

В работе [3] изложены принципы локально-независимого и внешнего управления судами в ситуации опасного сближения, приведены методы их реализации, а также рассмотрены перспективные способы выбора процесса расхождения.

При чрезмерном сближении судов в работе [4] предложена экстренная стратегия их расхождения.

Способ расхождения судна с двумя опасными целями последовательными отклонениями от каждой из них предложен в работе [5]. Компьютерной программой для выбранной ситуации опасного сближения были рассчитаны курсы маневра расхождения судна, причем относительные траектории расхождения касательные к круговым доменам целей.

Универсальный метод предупреждения столкновения судна с несколькими целями путем смещения на параллельную линию пути предложен в монографии [6], а в публикации [7] предложен новый фuzzi-метод для отклонения от столкновения на участках их скопления, с помощью которого может быть получено точное прогнозирование времени и позиции столкновения, что дает оператору СУДС возможность принятия решений по предупреждению столкновения судов.

Описание процесса расхождения судов в терминах дифференциальной антагонистической игры предложено в работе [8]. Анализируемые работы вносят значительный вклад в теорию решения проблемы предупреждения столкновений судов, однако они не являются приемлемыми при возникновении ситуаций опасного сближения судна с несколькими целями.

В работе [9] рассмотрено обоснование автономной судовой системы отклонения от столкновения и требования к ней, которые учитывают факторы, которые влияют на процесс отклонения от столкновения. В работе показано, что исследования по автоматизации управления судном проводятся классическим подходом, базирующемся на применении математических моделей и алгоритмов, или компьютерной технологией, которая использует искусственный интеллект.

## **Формулирование целей статьи (постановка задачи)**

Цель статьи заключается в разработке способа учета динамики судов при автоматическом выборе маневра расхождения уклонением одного судна и пассивным торможением другого.

### **Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов**

Рассмотрим процедуру автоматического определения параметров оптимального маневра расхождения уклонением одного судна и торможением другого судна с учетом их динамики.

Расчет оптимального безопасного маневра расхождения судов предполагает для заданного курса  $K_{1y}$  первого судна определить скорость торможения второго судна  $V_{2y}$ , при которой суда разойдутся на дистанции кратчайшего сближения  $D_{\min}$ , равной предельно-допустимой дистанции  $d_d$ . с учетом инерционности поворота первого судна и инерционно-тормозных характеристик второго судна. Скорость торможения второго судна рассчитывается в предположении ее снижения до значения  $V_{2y}$  и следование этой скоростью до момента времени кратчайшего сближения, после чего второе судно увеличивает скорость до начального значения.

Определение параметров безопасного маневра расхождения ( $K_{1y}, V_{2y}$ ) заключается в следующем. Прежде всего, маневры обоих судов должны начинаться в нулевой момент времени, и вначале необходимо определить момент времени  $t_{yk}$  окончания поворота первого судна и приращения его координат за это время. На этот момент времени вычисляются координаты судов, пеленг и дистанция между ними. После этого на тот же момент времени  $t_{yk}$  определяются приращения координат второго судна и его уменьшающаяся скорость  $V_{2t}(t_{yk})$ .

С помощью полученных значений  $K_{1y}$ ,  $V_1$ ,  $K_2$  и  $V_{2t}(t_{yk})$  рассчитываются относительный курс и дистанция кратчайшего сближения  $D_{\min}$ , которая сравнивается с предельно-допустимой дистанцией сближения  $D_d$ . При  $D_{\min}$  меньшем  $D_d$  значение скорости второго судна уменьшается на 0,1 узла, т. е. до величины  $V_{2y} = V_{2t}(t_{yk}) - 0,1$ , для которого опять рассчитываются длительность переходного процесса, пройденное расстояние, текущие значения координат, пеленг, дистанция, относительный курс и дистанция кратчайшего сближения  $D_{\min}$ . Вновь полученная дистанция кратчайшего сближения опять сравнивается с предельно-допустимой дистанцией  $D_d$ . В случае  $D_{\min} < D_d$  величина  $V_{2y}$  снова уменьшается на 0,1 узла и находится  $D_{\min}$ , которая сравнивается с  $D_d$ .

Циклический процесс расчета уменьшения скорости  $V_{2y}$  с шагом 0,1 узла производится до тех пор, пока не достигается равенство  $D_{\min} = D_d$ . В случае, когда при всех  $V_{2y} \geq 0$  указанное равенство не достигается, выполнение маневра расхождения снижением скорости второго судна невозможно.

Рассмотрим процедуру определения безопасного маневра при пассивном торможении второго судна в процессе расхождения. Для каждого из курсов уклонения первого судна вправо  $K_{1y}^{(s)}$  из интервала  $[K_1 + 30, K_1 + 70]$ , т. е.  $K_{1y}^{(s)} \in [K_1 + 30, K_1 + 70]$ , требуется

определить возможность безопасного расхождения остановкой второго судна пассивным торможением.

Для учета динамики первого судна интервал времени его поворота и приращения координат за это время в простейшем случае оцениваются с помощью модели поворота судна с постоянной угловой скоростью:

$$\tau_1 = \Delta K / a_{\omega},$$

где  $\Delta K$  - приращение курса судна за время поворота, причем  $\Delta K = K_{1y}^{(s)} - K_1$ ;

$a_{\omega}$  - угловая скорость поворота.

Приращение координат  $\Delta x_0$  и  $\Delta y_0$  судна за время поворота  $\tau_1$  определяется выражениями [3]:

$$\Delta x_0 = \frac{V_1}{a_{\omega}} (\cos K_1 - \cos K_{1y}^{(s)}),$$

$$\Delta y_0 = \frac{V_1}{a_{\omega}} (\sin K_{1y}^{(s)} - \sin K_1).$$

Если применяются более сложные динамические модели вращательного движения судна, то следует учитывать две фазы поворота судна, продолжительность которых  $\Delta t_k$  и  $\Delta t$  рассчитываются, как показано в работе [3].

Далее для начальной скорости второго судна  $V_2$  и пассивного режима торможения рассчитывается его выбег  $S$  и интервал времени  $\tau_2$  до полной остановки судна. Очевидно, координаты первого  $X_1, Y_1$  и второго  $X_2, Y_2$  судов на момент времени остановки второго судна определяются выражениями:

$$X_2 = S \sin K_2, \quad Y_2 = S \cos K_2,$$

$$X_1 = D \sin \alpha - V_1 \tau_2 \sin K_1 - \Delta x_0,$$

$$Y_1 = D \cos \alpha - V_1 \tau_2 \cos K_1 - \Delta y_0,$$

где  $\alpha$  и  $D$  - начальные пеленг со второго судна на первое и дистанция между ними.

Дистанция  $D_f$  между судами в момент времени остановки второго судна определяется выражением:

$$D_f = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}.$$

После чего следует сравнить полученную дистанцию  $D_f$  с предельно - допустимой дистанцией сближения  $D_d$ . Если  $D_f < D_d$ , то расхождение остановкой второго судна невозможно. В противном случае ( $D_f > D_d$ ) следует рассчитать дистанцию кратчайшего сближения первого судна с остановившимся вторым судном  $D_{\min f}$ :

$$D_{\min f} = \left| D_f \sin[\alpha_f - K_{1y}^{(s)}] \right|,$$

где  $\alpha_f$  - пеленг на второе судно в момент его остановки.

Если  $D_{\min f} > D_d$ , то возможно расхождение снижением скорости второго судна до определенного значения  $V_{2y}$ , при котором выполняется равенство:

$$D_{\min f}(V_{2y}) = D_d.$$

Значение искомой скорости  $V_{2y}$  рассчитывается способом последовательных приближений, в котором скорость торможения второго судна на каждом  $i$ -м цикле вычислений принимается равной  $V_{2y} = V_2 - 0,1 * i$ . Продолжительность переходного процесса торможения  $\tau(V_{2y})$  и пройденное за это время расстояние  $S(V_{2y})$  для пассивного торможения рассчитываются с помощью выражений, приведенных в работе [3]:

$$\tau(V_{2y}) = \frac{(1+k)m}{\mu V_2} \left( \frac{V_2}{V_{2y}} - 1 \right),$$

$$S(V_{2y}) = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_2^2}{V_{2y}^2} \right|,$$

где  $(1+k)m$  - масса второго судна с присоединенными массами воды;

$\mu$  - коэффициент сопротивления.

Вычисления циклически продолжаются до тех пор, пока не наступает справедливость равенства:

$$D_{\min f}(V_{2y}) = D_d.$$

Для каждого безопасного маневра расхождения  $(K_{1y}, V_{2y})$  рассчитывается критерий оптимальности  $Q = \Delta K_1 \Delta V_2$ . В качестве оптимального выбирается маневр расхождения с минимальным значением критерия оптимальности  $Q$ .

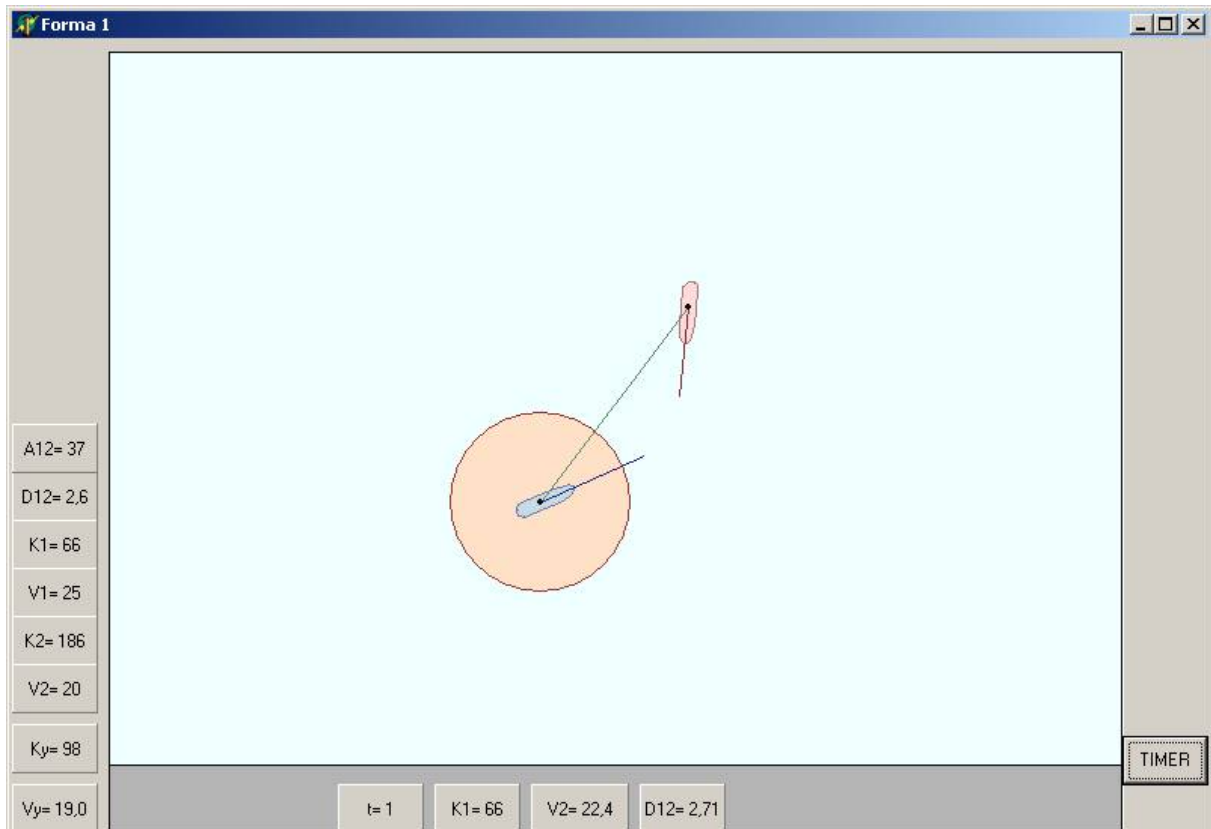
Аналогично производится расчет параметров безопасного маневра расхождения для курсов уклонения судна влево.

В качестве примера рассмотрим способ автоматического определения оптимального маневра расхождения изменениями курса и снижения скорости вторым судном пассивным торможением. Для этого выбрана ситуация опасного сближения судов, которая характеризуется параметрами  $\alpha=37^\circ$ ,  $D=2,6$  мили,  $K_1 = 66^\circ$ ,  $V_1 = 25$  уз,  $K_2 = 186^\circ$ ,  $V_2 = 20$  уз,  $D_d = 1$  мили.

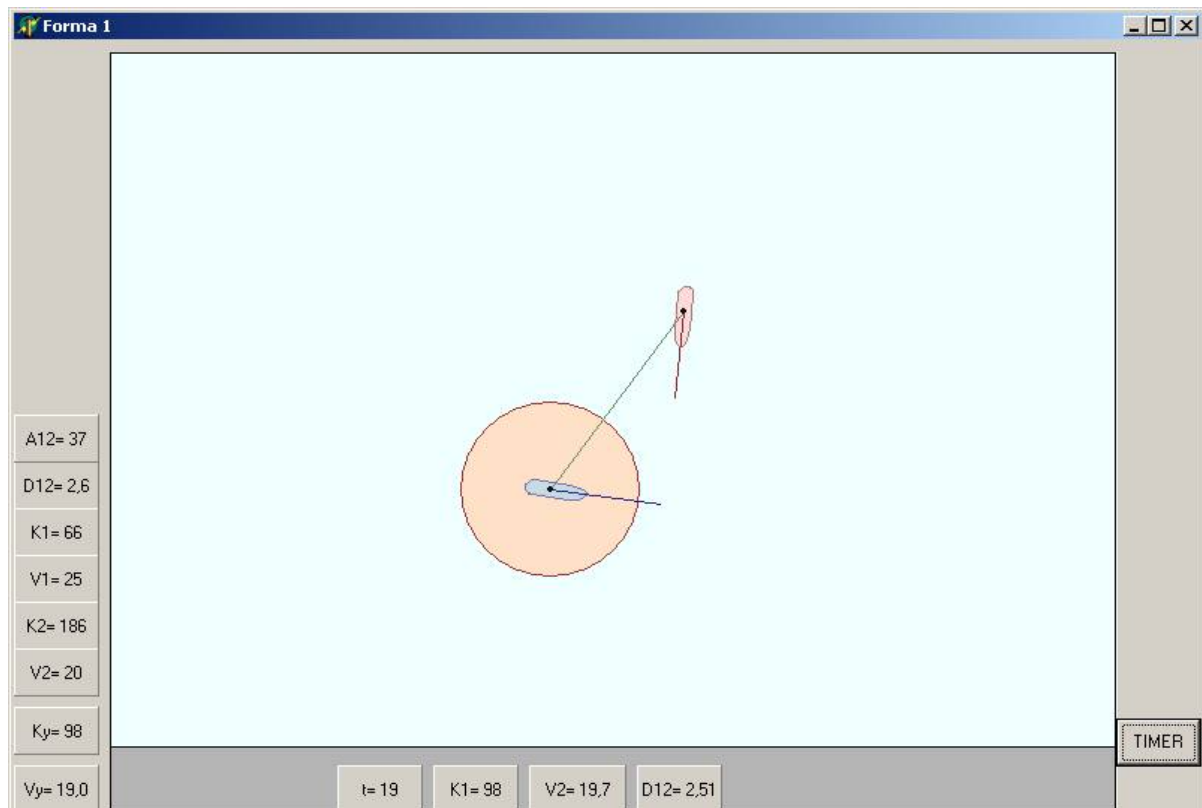
Компьютерной программой были рассчитаны параметры маневра расхождения при уклонении первого судна вправо  $K_{1y} = 98^\circ$  и  $V_{2y} = 19$  уз. Корректность рассчитанного маневра расхождения была подтверждена имитационным моделированием. На рис. 1 показано начало процесса расхождения, а завершение поворота первым судном на 19 секунде отображено на рис. 2. Торможение второго судна завершается на 24 секунде, что показано на рис. 3, а ситуация кратчайшего сближения судов представлена на рис. 4.

### **Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению**

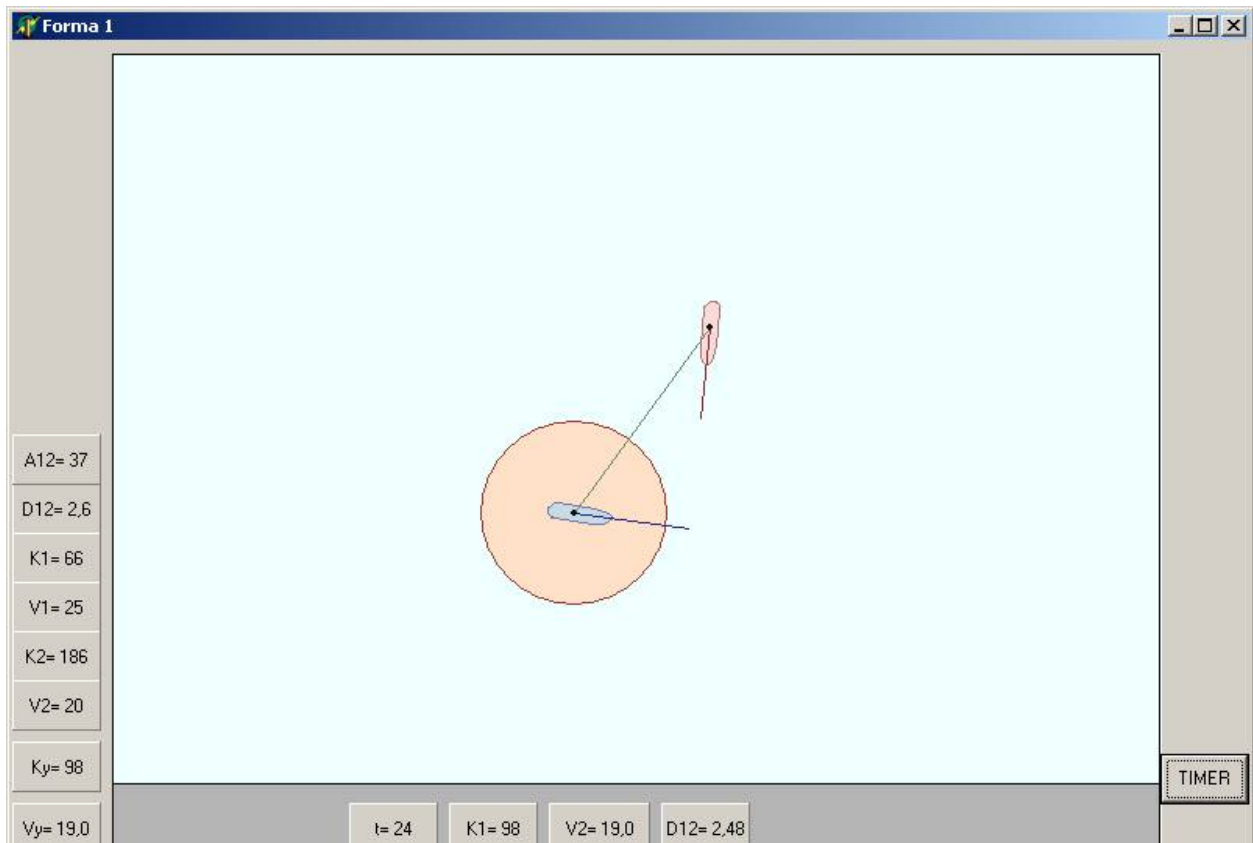
Таким образом, в данной статье предложен метод автоматического расчета параметров оптимальной стратегии расхождения судов одновременными изменениями курса одного судна и пассивным торможением другого судна. В дальнейшем целесообразно рассмотреть возможность автоматического определения параметров стратегии расхождения судна с двумя опасными целями.



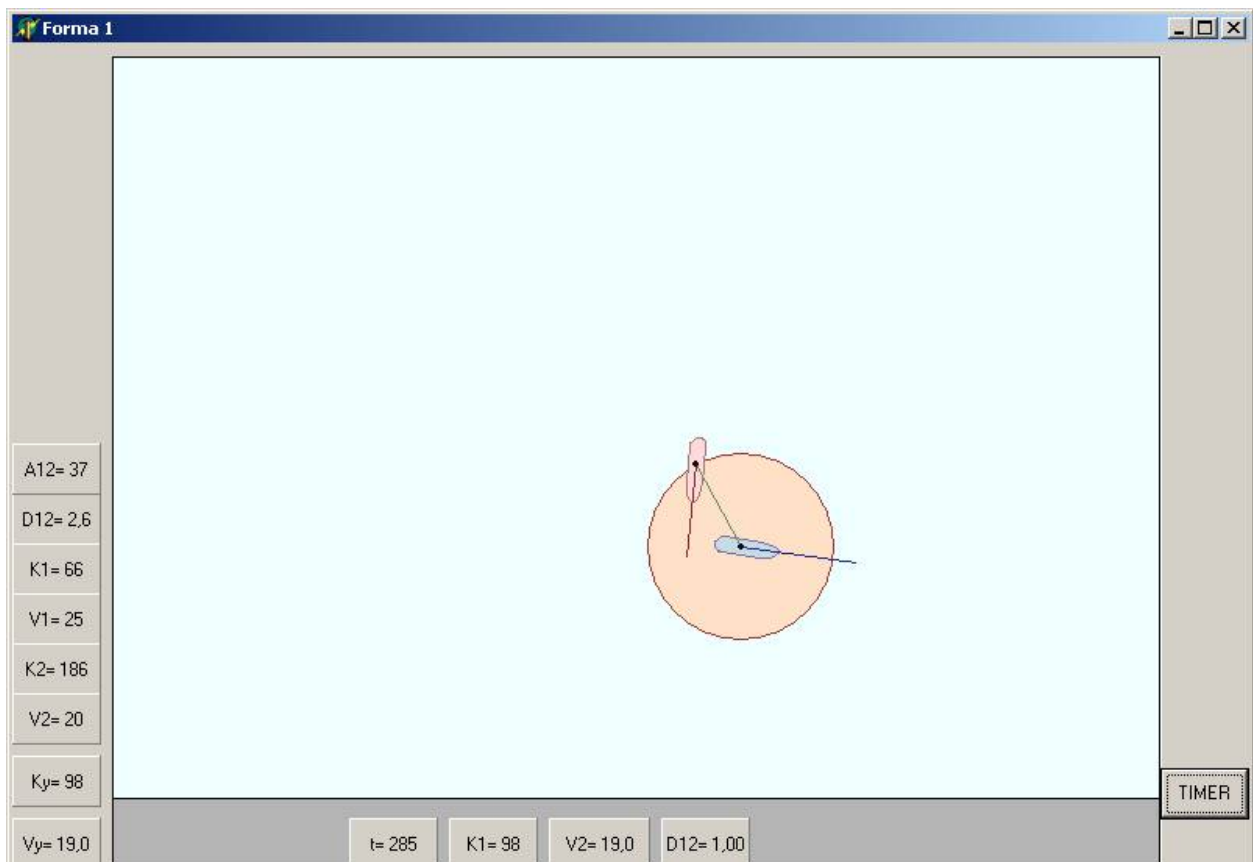
*Рис. 1. Начало процесса расхождения*



*Рис. 2. Завершение поворота первым судном*



*Рис. 3. Окончание торможения второго судна*



*Рис. 4. Ситуация кратчайшего сближения судов*



**ЛИТЕРАТУРА**

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
7. 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.
8. 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.
9. 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.