

УДК 656.61.052.484

DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.37-46

## IMITATION DESIGN OF PROCESS OF DIVERGENCE OF VESSELS BY URGENT DEVIATION AT EXCESSIVE RAPPROCHEMENT

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ ЭКСТРЕННЫМ УКЛОНЕНИЕМ ПРИ ЧРЕЗМЕРНОМ СБЛИЖЕНИИ

**A.I. Burmaka**, *PhD, associate professor*, **V.V. Kaliuzhny**, *senior lecturer*  
**А.И. Бурмака**, *к.т.н., доцент*, **В.В. Калюжний**, *старший преподаватель*

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

### ABSTRACT

For conducting of imitation design of process of urgent divergence the computer program, which contains the module of choice of initial situation of excessive rapprochement, module of analysis of current situation and choice of safe maneuver of urgent divergence, was developed.

The imitation program analyses the situation of excessive rapprochement from positions of target, determines urgent strategy of divergence and manages motion of target.

An user can manage motion of ship by a scroll bar, causing of helm of ship during 20 s, since the moment of including of timer. The imitation program analyses the maneuver of ship and in the case of necessity corrects strategy of urgent divergence. After the stage of output of target on a course equal to the reverse bearing on a ship, the parameters of urgent strategy of divergence are determined.

At the imitation design three variants of conduct of ship were examined: followings with the unchanging parameters of motion, a ship deviates to the right and a ship deviates to the left. Thus beginning of deviation was produced at any point to time on an interval from 0 to 20 s. After 20 s the imitation program the helm of ship was automatically driven to the diametric plane and course of ship became unchanging. This moment of time was perceived by a target, as end of maneuver of ship and on the parameters of situation in the moment of ending of deviation of ship estimation of danger of rapprochement was produced and new parameters of urgent strategy of divergence, which was immediately realized by a target, in the case of necessity settled accounts.

Some variants of initial situations of excessive rapprochement are resulted in the article, in which urgent strategy of divergence of target contains the first stage of deviation only, the parameters of which depend on the conduct of ship. Three situations of rapprochement of vessels with a different conduct of one of them are considered in all.

The resulted examples are shown, that depending on the situation of excessive rapprochement and conduct of ship the first stage can be transformed in relation to a standard variant by the choice of a different trajectory of divergence.

**Keywords:** Safety of navigation, warning of collision of vessels, excessive rapprochement, urgent divergence.

### РЕФЕРАТ

Для проведення імітаційного моделювання процесу екстреного розходження була розроблена комп'ютерна програма, яка містить модуль вибору початкової ситуації надмірного зближення, модуль аналізу поточної ситуації і вибору безпечного маневру екстреного розходження.

Імітаційна програма аналізує ситуацію надмірного зближення з позицій цілі, визначає екстрену стратегію розходження і управляє рухом цілі.

Користувач може управляти рухом судна за допомогою лінійки прокрутки, викликаючи перекладання керма судна протягом 20 с, починаючи з моменту включення таймера. Імітаційна програма аналізує маневр судна і у разі потреби коректує стратегію екстреного розходження. Після етапу виходу цілі на курс, рівний зворотному пеленгу на судно, визначаються параметри екстреної стратегії розходження.

При імітаційному моделюванні розглядалося три варіанти поведінки судна: розходження з незмінними параметрами руху, судно ухиляється управо і судно ухиляється вліво. Причому початок ухилення проводився у будь-який момент часу на інтервалі від 0 до 20 с. Після 20 с імітаційною програмою кермо судна автоматично приводилося в діаметральну площину і курс судна ставав незмінним. Цей момент часу сприймався цілю, як кінець маневру судна і по параметрах ситуації у момент закінчення ухилення судна проводилася оцінка небезпеки зближення і у разі потреби розраховувалися нові параметри екстреної стратегії розходження, яка негайно реалізувалася цілю.

У статті приведені деякі варіанти початкових ситуацій надмірного зближення, в яких екстрена стратегія розходження цілі містить тільки перший етап ухилення, параметри якого залежать від поведінки судна. Всього розглянуто три ситуації зближення суден з різною поведінкою одного з них.

Приведені приклади показують, що залежно від ситуації надмірного зближення і поведінки судна перший етап може трансформуватися щодо стандартного варіанту шляхом вибору різної траєкторії розходження.

**Ключові слова:** безпека судноводіння, попередження зіткнення суден, надмірне зближення, екстрене розходження.

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

Стесненные в навигационном отношении районы характеризуются высокой интенсивности судового потока и наличием навигационных опасностей. Плавание судов в таких районах связано с повышенным риском

столкновений, поэтому снижение аварийности судов при плавании в стесненных водах является важнейшей проблемой обеспечения безопасности судовождения, а совершенствование процесса предупреждения столкновений опасно сближающихся судов представляет собой перспективную тематику научных исследований.

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

В работе [1] оптимизация процесса расхождения производится по нескольким критериям оптимальности, а в работах [2,3] задача расхождения формализуется моделями теории дифференциальных игр.

Решение задачи расхождения одношаговым маневров предупреждения столкновения судов предложено в работе [4]. В монографии [5] предложена оптимизация маневра расхождения по комплексному критерию в случае применения метода смещения на линию параллельную пути судна. В работе [6] предложена алгоритмизация МППСС-72 в части маневрирования по предупреждению столкновений судов, а в работе [7] приведен анализ эффективности стандартных маневров расхождения. Монография [8] посвящена исследованию локально-независимого управления процессом расхождения и разработке метода формирования каркаса взаимодействия судна с группой целей, используя принцип гибких стратегий расхождения. Рассмотрению концепций локально-независимого и полного внешнего управления процессом расхождения судов посвящена работа [9].

Вариант компьютерной информационной системы поддержки решений по предупреждению столкновений судов рассмотрен в работе [10], а работа [11] посвящена оперативному способу определения маневра уклонения судна с учетом навигационных препятствий.

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

Цель статьи - анализ результатов имитационного моделирования процесса расхождения судна с опасной целью в ситуации чрезмерного сближения на этапе экстренного уклонения.

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

При обнаружении ситуации чрезмерного сближения, признаки которого содержатся в правиле 17 МППСС-72, оперирующее судно, следуя минимаксной стратегии, которая предполагает наиболее неблагоприятный маневр уклонения цели, должно лечь на курс  $K_0$ , равный обратному пеленгу на цель [12], т.е.:

$$K_0 = \alpha + 180,$$

где  $\alpha$  - пеленг на цель.

При этом в зависимости от относительной позиции и параметров движения судна и цели получено выражение для скорости изменения пеленга  $\dot{\alpha}$ :

$$\dot{\alpha} = \frac{V_1(t)\sin[K_1(t) - \alpha(t)] - V_2(t)\sin[K_2(t) - \alpha(t)]}{L_t},$$

где  $V_1(t)$  и  $K_1(t)$  - параметры движения цели;

$V_2(t)$  и  $K_2(t)$  - параметры движения судна;

$\alpha(t)$  и  $L_t$  - текущие значения пеленга и дистанции.

Отметим, что поворот на указанный курс производится в сторону от направления на цель. Данный этап стратегии расхождения можно назвать минимизацией скорости сближения с целью. Предположим, что скорость цели  $V_2$  превосходит скорость судна  $V_1$ , т. е.  $V_2 > V_1$ .

Если скорость судна меньше скорости цели  $V_2 > V_1$ , то при изменении курса судна на  $360^\circ$  относительный курс изменяется лишь в некотором секторе, достигая максимального и минимального значений, величина которых определяется выражениями [1]:

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

где  $K_{otmin}$  и  $K_{otmax}$  - соответственно минимальное и максимальное значения относительного курса;

$K_2$  - курс цели;  $\rho = V_1/V_2$ , причем в рассматриваемом случае  $\rho < 1$ .

Очевидно, если скорость судна меньше скорости цели, то максимально возможная дистанция кратчайшего сближения  $\max L_{min}$  достигается при относительных курсах  $K_{otmin}$  или  $K_{otmax}$ . Если через  $K_{extr}$  обозначить экстремальный относительный курс ( $K_{otmin}$  или  $K_{otmax}$ ), на котором достигается дистанция кратчайшего сближения  $\max L_{min}$ , то при условии, что цель не изменяет параметры движения, выражение для  $\max L_{min}$  имеет следующий вид [1]:

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

где  $\alpha$ ,  $D$  - соответственно пеленг на цель и дистанция между судном и целью.

Так как с момента времени начала отворота судна от начального программного курса пеленг  $\alpha$  и дистанция  $D$  изменяются, то в момент времени  $t_{on}$  достижения курса судна значения курса «убегания»  $K_o$  необходимо оценить текущую относительную позицию. Для этого следует рассчитать экстремальные относительные курсы и вычислить максимально возможную дистанцию кратчайшего сближения  $\max L_{min}$ . Затем надлежит проверить справедливость неравенства  $\max L_{min} \leq L_d$ . При справедливости данного неравенства судно продолжает следовать курсом  $K_o$  до тех пор, пока максимально возможная дистанция кратчайшего сближения  $\max L_{min}$  не станет равной дистанции кратчайшего сближения  $L_d$ , т. е.  $\max L_{min} = L_d$ . В данный

момент времени необходимо изменить курс судна на величину, при которой достигается экстремальное значение относительного курса и максимальное значение дистанции кратчайшего сближения. Как показано в работе [1], экстремальные относительные курсы  $K_{otmin}$  и  $K_{otmax}$  достигаются соответственно при курсах судна:

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

Следуя одним из указанных курсов, судно перемещается в сторону цели, и дистанция  $D$  между судном и целью сокращается, причем контролируется справедливость неравенства  $L_{min} \leq L_d$ . Если неравенство справедливо, то продолжаем следовать экстремальным курсом. В момент времени, когда неравенство обратится в равенство, проверяем, не достигла ли дистанция между судном и целью значения  $L_d$ , т.е. справедливость равенства  $D = L_d$ . При наступлении равенства имеется возможность лечь на курс выхода на программную траекторию  $K_b$ , причем участок выхода на программную траекторию движения судна расположен под углом  $\gamma=30^\circ-40^\circ$  к программной траектории, т. е.  $K_b = K_n \pm \gamma$ , где  $K_n$  - начальный курс судна.

Судно следует курсом выхода  $K_b$  до тех пор, пока не достигает программной траектории, после чего ложится на начальный курс  $K_n$ , перемещаясь по программной траектории.

С помощью имитационного моделирования рассмотрим более подробно первый этап стратегии экстренного расхождения, когда судно уклоняется с начального курса до курса минимизации скорости сближения, который равен обратному пеленгу на цель.

С целью проведения имитационного моделирования процесса экстренного расхождения была разработана компьютерная программа, которая анализирует ситуацию чрезмерного сближения с позиций цели, определяет экстренную стратегию расхождения и управляет движением цели. Причем имеется возможность в течение 20 с, начиная с момента включения таймера, управлять движением судна, которое анализируется имитационной программой и учитывается при экстренном уклонении цели.

В процессе имитационного моделирования анализировалось маневрирование цели при различных вариантах поведения судна на интервале от 0 до 20 с процесса моделирования. Моделировались следующие варианты поведения судна: движения с неизменным курсом, уклонения судна вправо относительно начального направления движения и его уклонения влево.

В работе рассмотрено три примера ситуаций чрезмерного сближения судна с целью с различными типами поведения судна в начале процесса проигрывания маневра расхождения. Результаты моделирования представлены на рисунках, состоящих из двух фрагментов, причем на первом фрагменте отображены траектории движения судна и цели в процессе расхождения, а на втором - последовательные положения судна и цели в течение маневра.

Первая ситуация сближения характеризуется движением судна неизменным курсом  $170^\circ$ , а на рис. 1 отображен маневр экстренного расхождения цели, которая выполняет циркуляцию, уклоняясь от судна. После циркуляции цель возвращается на программную траекторию и продолжает движение курсом  $225^\circ$ .

Для второго примера использована та же ситуация чрезмерного сближения, однако в начале процесса проигрывания судно уклоняется влево из курса  $170^\circ$  на курс  $130^\circ$ , как показано на рис. 2. Цель вначале легла на циркуляцию, а затем после изменения курса судна влево вышла на курс "убегания" и следовала им, пропуская судно. После этого цель отворотом влево легла на курс  $265^\circ$  для выхода на программную траекторию движения.

В третьем примере была использована ситуация чрезмерного сближения, показанная на рис. 3, в которой судно сближается с целью на контркурсах. В начале процесса проигрывания маневра судно уклоняется вправо с курса  $45^\circ$  на курс  $95^\circ$ . Как следует из рис. 3, до поворота судна цель начала циркуляцию вправо для экстренного уклонения, но после поворота судна вправо цель повернула влево для выхода на программную траекторию движения.

Приведенные примеры показывают, что в зависимости от ситуации чрезмерного сближения и поведения судна первый этап может трансформироваться.

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

В результате анализа имитационного моделирования процесса расхождения судна с опасной целью в ситуации чрезмерного сближения на этапе экстренного уклонения было установлено, что в зависимости от ситуации чрезмерного сближения и поведения судна первый этап может реализоваться в различных вариантах.

В дальнейшем представляет интерес рассмотреть имитационное моделирование полного процесса экстренного расхождения.

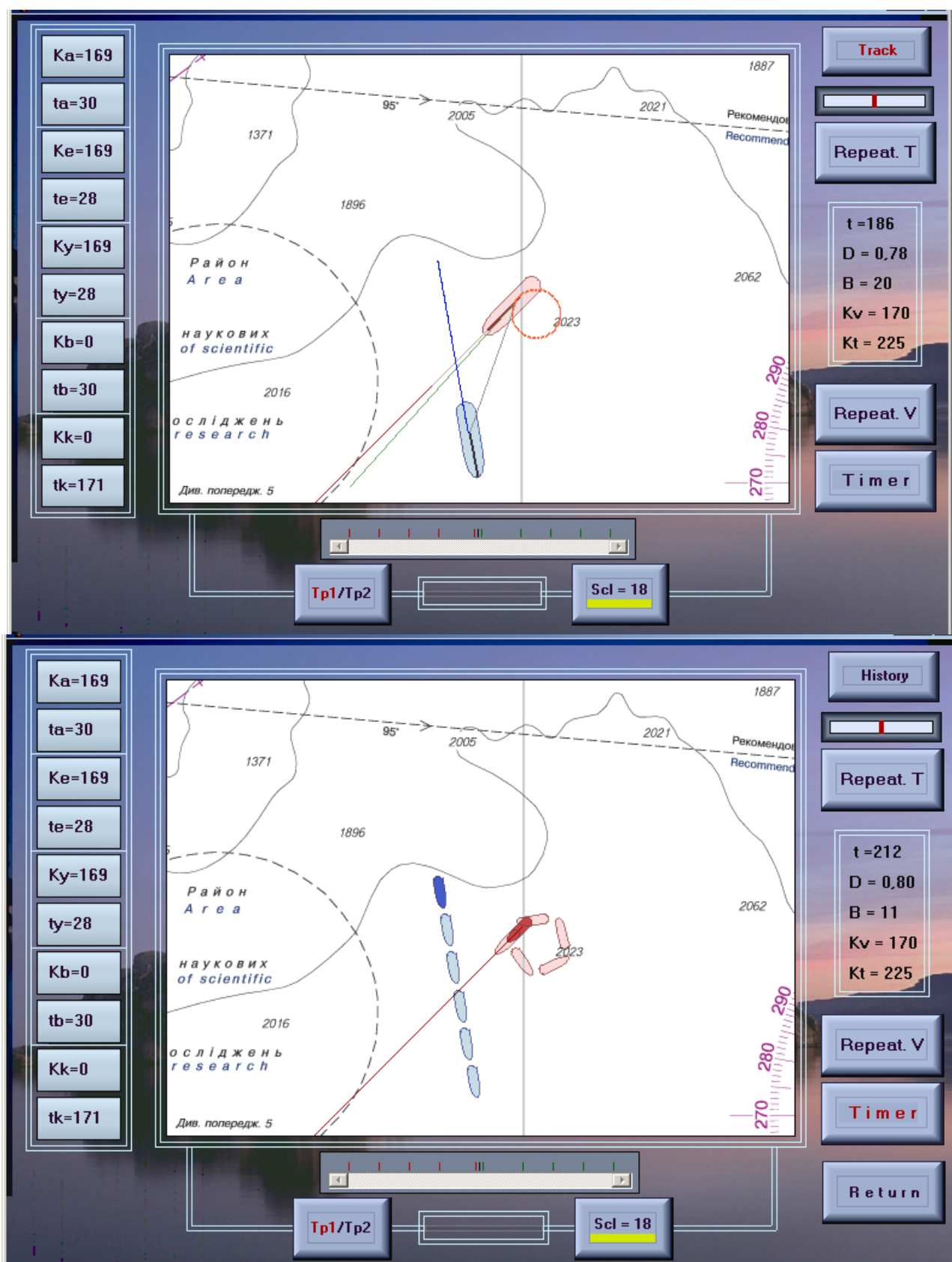


Рис. 1. Экстренная стратегия цели при отсутствии маневра судна

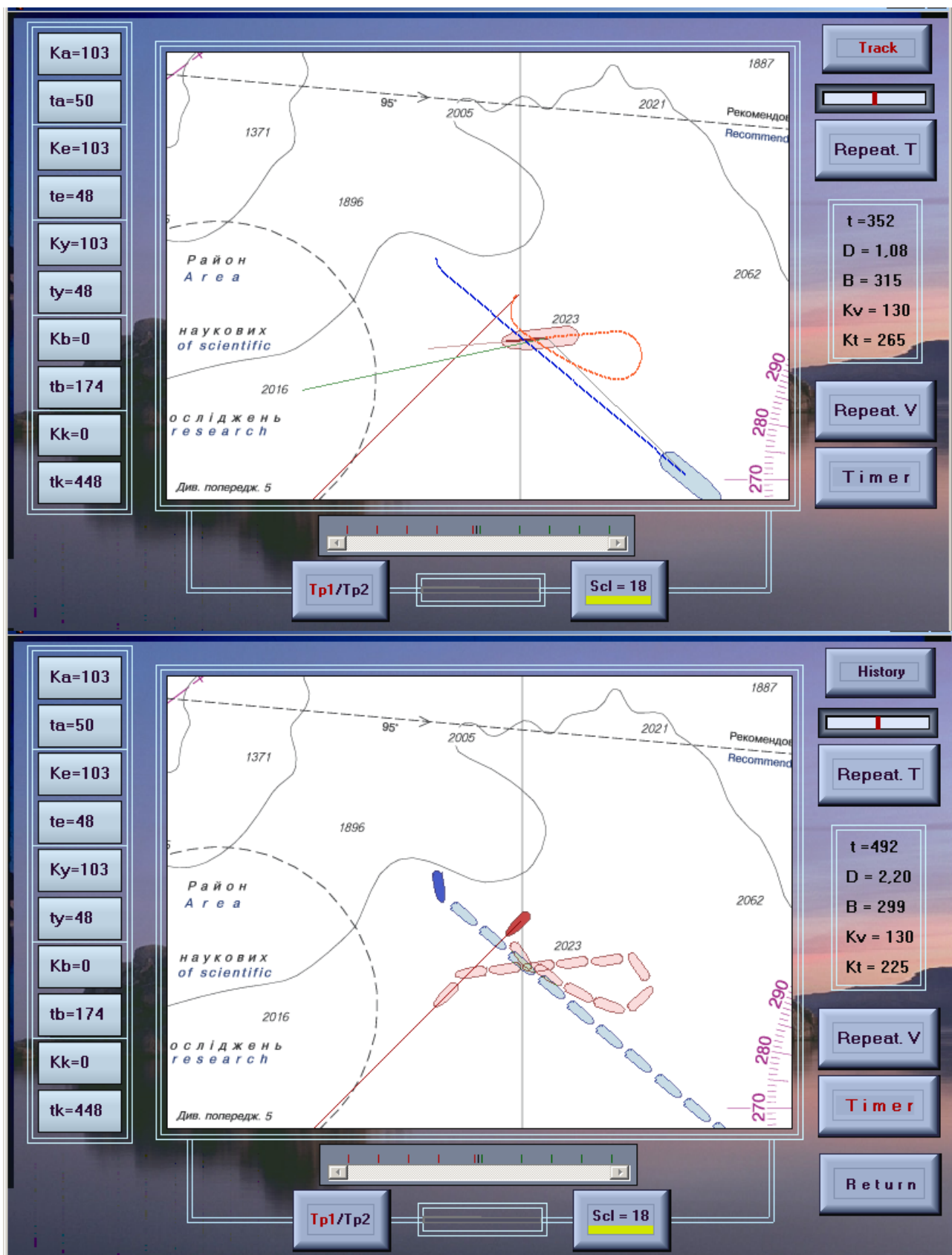


Рис. 2. Экстренная стратегия цели при уклонении судна влево



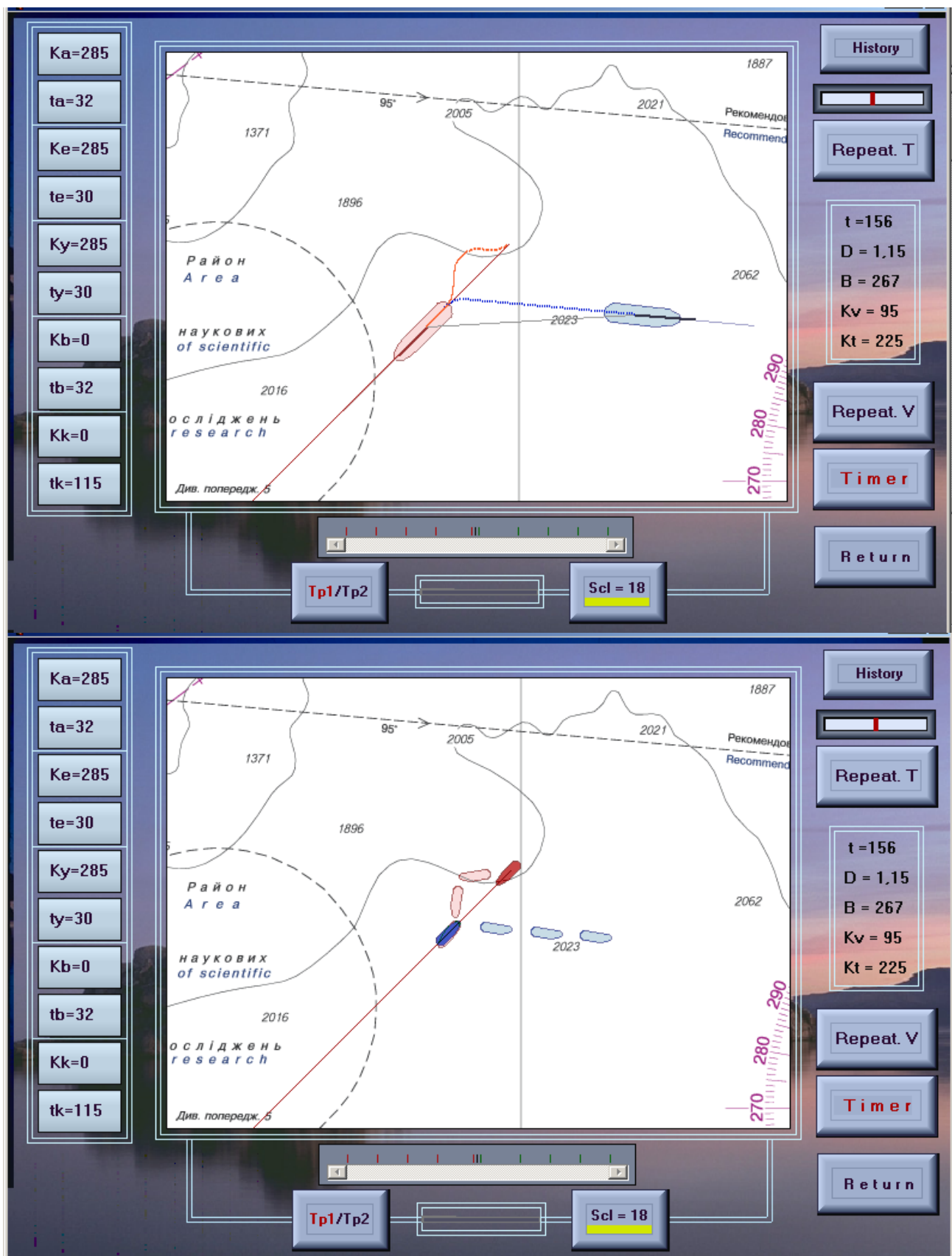


Рис. 3. Экстренная стратегия цели при уклонении судна вправо

## ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / Куликов А. М., Поддубный В. В. // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22 - 24.
2. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / Кудряшов В. Е. // Судостроение. – 1978. - №5. – С. 35 - 40.
3. 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.
4. 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.
5. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Вагущенко Л.Л. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
6. 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.
7. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Пятаков Э.Н., Заичко С.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.15. - Одесса: "ИздатИнформ", 2008. – С. 166 – 171.
8. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
9. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Пятаков Э.Н., Булгаков А.Ю. - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.
10. 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.
11. 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.
12. 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.