

Выбор стратегии расхождения группы судов методами внешнего управления

И. А. Бурмака

Национальный Университет «Одесская Морская Академия», Одесса, Украина
Corresponding author. E-mail: burmaka-mob@ukr.net

Paper received 08.12.17; Revised 13.12.17; Accepted for publication 15.12.17.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2017-148V16-18>

Аннотация. Показано, что основным методом внешнего управления процессом расхождения судов являются области опасных курсов сближающихся судов, с помощью которых производится выбор маневра расхождения пары судов. Показан метод выбора безопасных курсов расхождения в ситуации опасного сближения четырех судов. Приведен численный пример и результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: безопасность судоходства, расхождение судов при опасном сближении, внешнее управление процессом расхождения, области опасных курсов, безопасное расхождение группы судов.

Введение. Стесненные воды характеризуются интенсивным судоходством и наличием навигационных опасностей, что способствует повышенной аварийности судов при плавании в этих районах. Поэтому стесненные районы плавания с особенно интенсивным движением оборудуются станциями управления движением судов (СУДС), назначением которых является контроль процесса судоходства и управления движением опасно сближающихся судов. Актуальным для эффективной работы СУДС является оснащение современными средствами предупреждения столкновения судов, которые обеспечивают безопасное расхождение группы опасно сближающихся судов. Этим обстоятельством обуславливается актуальность и перспективность исследования управления судами в ситуации опасного сближения при плавании в районах контроля СУДС.

Краткий обзор публикаций по теме. Различные модели формализации взаимодействия судов в ситуации опасного сближения при локально-независимом управлении их процессом расхождением рассмотрены в работах [1-8]. Метод нелинейной интегральной инвариантности для описания процесса расхождения и выбора одношагового маневра предупреждения столкновения предлагается в работе [1], а в работах [2, 3] с помощью методов теории дифференциальных игр производится формализация взаимодействия судов при расхождении. Методы теории оптимальных дискретных процессов для описания процесса расхождения используются в работе [4]. Унифицированный подход к формализации взаимодействия судов при возникновении угрозы столкновения изложен в работе [5], с помощью которого предложена алгоритмизация МППСС-72. В монографии [6] приведен метод предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути, а в работе [7] изложены результаты исследования эффективности парных маневров расхождения. В монографии [8] всесторонне исследован принцип локально-независимого управления процессом расхождения и разработан метод гибких стратегий их расхождения, который согласно требованиям МППСС-72 позволяет сформировать стратегию расхождения судна с несколькими опасными целями с учетом навигационных опасностей и динамики судна.

При управлении процессом расхождения судов с помощью СУДС исчезает необходимость во взаимном согласовании маневров судов механизмом взаимодействия, т. е. реализуется принцип внешнего полного управления процессом расхождения, методы которого изложены в работах [9, 10, 11], а исследование его ос-

новных возможностей в ситуациях опасного сближения нескольких судов составляет содержание данной статьи.

Цель. Цель настоящей статьи - разработка процедуры выбора стратегии расхождения группы судов методами внешнего управления.

Материалы и методы. Рассмотрим ситуацию сближения четырех судов и покажем возможность формирования стратегии их расхождения изменением курсов методом внешнего управления с помощью областей опасных курсов. Как следует из работы [10], группа четырех сближающихся судов характеризуется матрицей ситуационного возмущения W :

$$W = \begin{pmatrix} 0 & \omega_{12} & \omega_{13} & \omega_{14} \\ \omega_{21} & 0 & \omega_{23} & \omega_{24} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & 0 & \omega_{34} \\ \omega_{41} & \omega_{42} & \omega_{43} & 0 \end{pmatrix},$$

где ω_{ij} - ситуационное возмущение, характеризующее сближение i -го и j -го судов.

Если ситуационное возмущение ω_{ij} отлично от нуля, то дистанция кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ меньше предельно-допустимой дистанции D_d и компенсация ситуационного возмущения возможна с помощью области опасных курсов S_{Dij} [10]. На рис. 1 показана область опасных курсов для случая $V_i < V_j$.

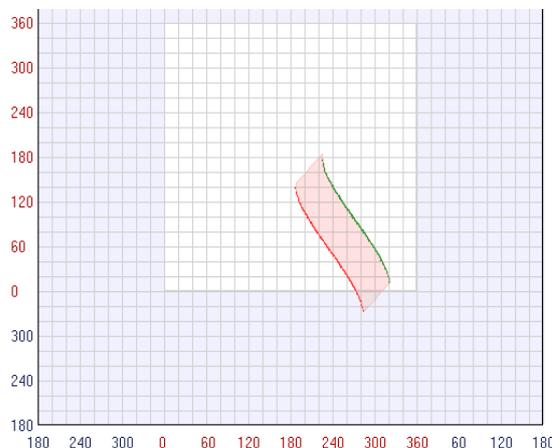


Рис. 1. Область S_{Dij} опасных курсов κ_i и κ_j при $v_i < v_j$

На рис. 2. приведена область S_{Dij} опасных курсов

K_i и K_j при $V_i > V_j$. Область S_{Dij} опасных курсов двух судов предназначена для выбора их безопасных курсов уклонения, обеспечивающие их расхождение на расстоянии, которое больше величины предельно-допустимой дистанции. Если точка с координатами (K_i, K_j) принадлежит области опасных курсов S_{Dij} , т. е. $(K_i, K_j) \in S_{Dij}$, то ситуационное возмущение ω_{ij} отлично от нуля. Для его компенсации, т. е. $\omega_{ij} = 0$, следует выбрать курсы уклонений судов K_{yi} и K_{yj} таким образом, чтобы точка (K_{yi}, K_{yj}) не принадлежала области S_{Dij} . В этом случае дистанция кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ больше предельно-допустимой дистанции D_d и сближение i -го и j -го судов является безопасным..

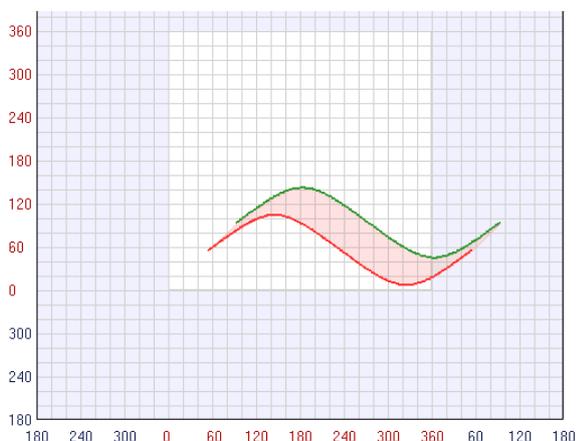


Рис. 2. Область опасных S_{Dij} курсов K_i и K_j при $V_i > V_j$

Результаты и их обсуждение. В качестве примера рассмотрим ситуацию опасного сближения четырех судов, показанную на рис. 3, в которой все ситуационные возмущения отличны от нуля, т. е. $\omega_{12} = \omega_{13} = \omega_{14} = \omega_{23} = \omega_{24} = \omega_{34} = 1$.

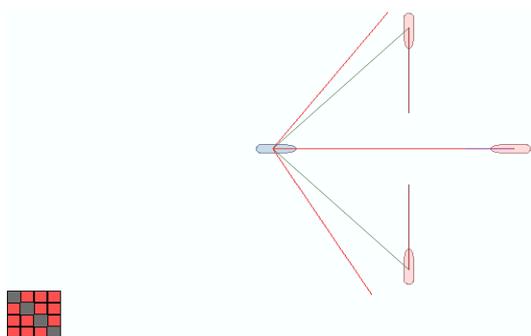


Рис. 3. Начальная ситуация сближения судов

Условие выбора безопасных курсов уклонения сближающихся судов имеет вид [10]:

$$\begin{aligned} (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2} + \Delta K_2) &\notin S_{D12}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D13}, \\ (K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D14}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n3} + \Delta K_3) &\notin S_{D23}, \\ (K_{n2} + \Delta K_2, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D24}, \\ (K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) &\notin S_{D34}, \end{aligned}$$

где K_{ni} и ΔK_i ($i=1 \div 4$) - соответственно начальные курсы судов и приращения их курсов уклонения.

Для выбора безопасных курсов уклонения была разработана компьютерная программа, которая также в левом нижнем углу индицирует матрицу ситуационного возмущения в виде индикатора опасности, как показано на рис. 3, причем красным цветом индицируется наличие ситуационного возмущения $\omega_{ij} = 1$, а зеленым цветом - его отсутствие $\omega_{ij} = 0$. Из рисунка следует, что все ситуационные возмущения отличны от нуля.

Анализ начальной ситуации сближения судов показывает, что для обращения матрицы ситуационного возмущения в нулевую матрицу необходимо изменение курсов не менее трех судов. Поэтому вначале рассмотрим выбор безопасных курсов первого и второго судов, для чего в верхнем левом углу рис. 4 используем клавишу "12", после чего происходит отображение области опасных курсов первого и второго судов (рис. 5).

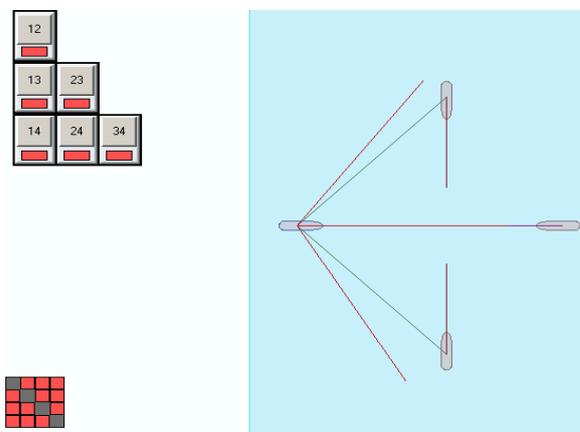


Рис. 4. Клавиши матрицы ситуационного возмущения

С помощью клавиши "K1" выбираем курс первого судна K1 и начинаем уменьшать его значение (зеленая линия) до обращения в ноль ситуационных возмущений ω_{12} , ω_{13} и ω_{14} , как показано на рис. 5, причем соответствующие сектора индикатора опасности принимают зеленый цвет.

Затем с помощью клавиши «K2» выбираем курс второго судна и увеличиваем его (красная линия) с помощью линейки прокрутки, как показано на рисунке 6, до обращения в ноль ситуационных возмущений ω_{23} и ω_{24} , что видно из индикатора опасности, соответствующие сектора которого окрашены в зеленый цвет. Таким образом, пять ситуационных возмущений компенсированы изменением курса первого судна на 64° влево и курса второго судна вправо на 88° .

Однако осталось некомпенсированным ситуационное возмущение ω_{34} , для чего необходимо изменить курс третьего или четвертого судна. В любом случае, необходим вывод области опасных курсов третьего и четвертого судов, которая показана на рис.7. Анализируя рис. 7, обращаем внимание на то обстоятельство, что точка пересечения начальных курсов судов принадлежит области опасных курсов. Для вывода точки пересечения курсов из области опасных курсов с минимальным изменением курса следует произвести отворот третьего судна вправо до границы области.

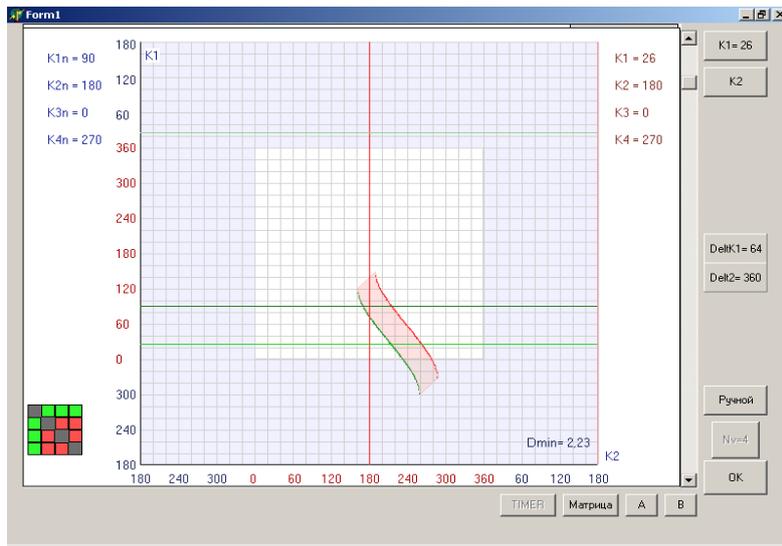


Рис. 5. Выбор безопасного курса K_1 первого судна

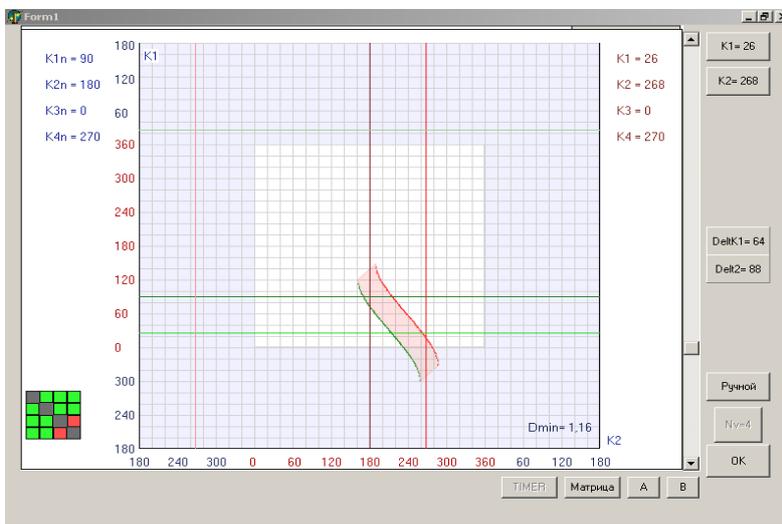


Рис. 6. Выбор безопасного курса K_2 второго судна

Как следует из рисунка 7, это происходит при повороте третьего судна на курс 24° , индикатор опасности показывает, что в этом случае матрица ситуационного

возмущения обращается в нулевую матрицу, а дистанция кратчайшего сближения третьего и четвертого судов составит 1,03 мили.

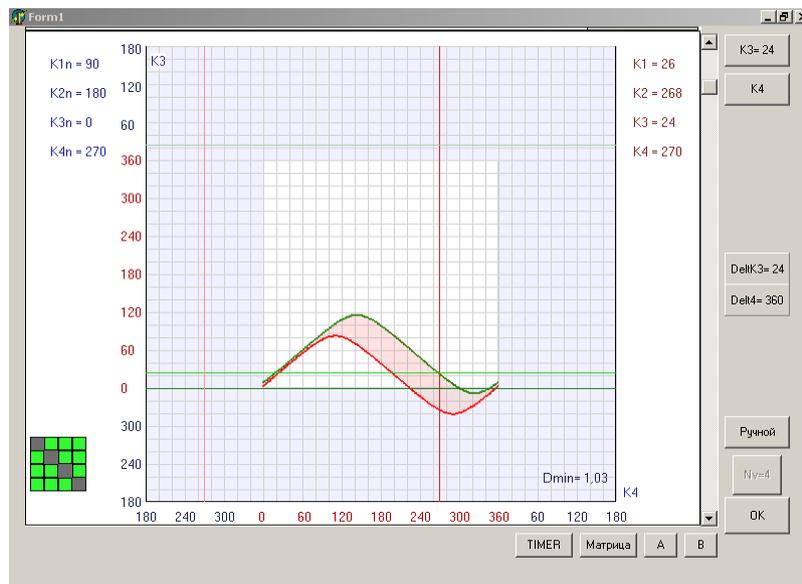


Рис. 7. Выбор безопасного курса K_3 третьего судна

Для проверки корректности предложенного метода выбора стратегии расхождения изменением курсов судов с использованием областей их опасных курсов была разработана имитационная программа проигрывания заданного процесса расхождения с полученными параметрами. С помощью этой программы проигрывался процесс расхождения, рассмотренный в данной статье. Начало процесса расхождения на 3с времени представлено на рис. 8, и суда с выбранными курсами уклонения $K_{y1} = 26^\circ$, $K_{y2} = 268^\circ$, $K_{y3} = 24^\circ$, $K_{y4} = 270^\circ$ с начальных позиций перемещаются по своим траекториям. Об-

ращаем внимание, что четвертое судно сохраняет начальный курс.

Завершение процесса расхождения на 534 с времени отображено на рис. 9. Причем в процессе расхождения дистанция между судами не сокращалась меньше предельно-допустимого значения, равного 1 миле. Поэтому результаты имитационного моделирования процесса расхождения подтверждают корректность рассмотренного метода выбора безопасных курсов уклонения при опасном сближении группы судов.

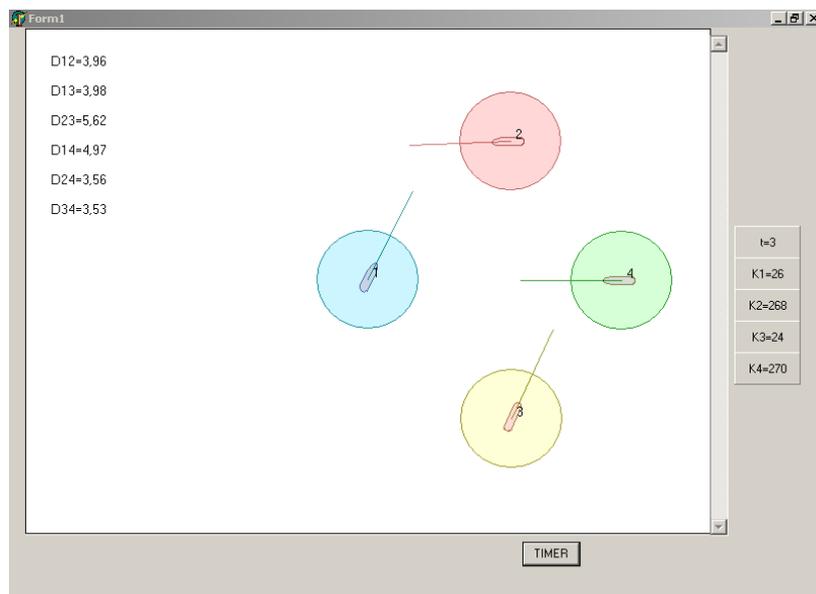


Рис. 8. Начало процесса расхождения на 3с времени

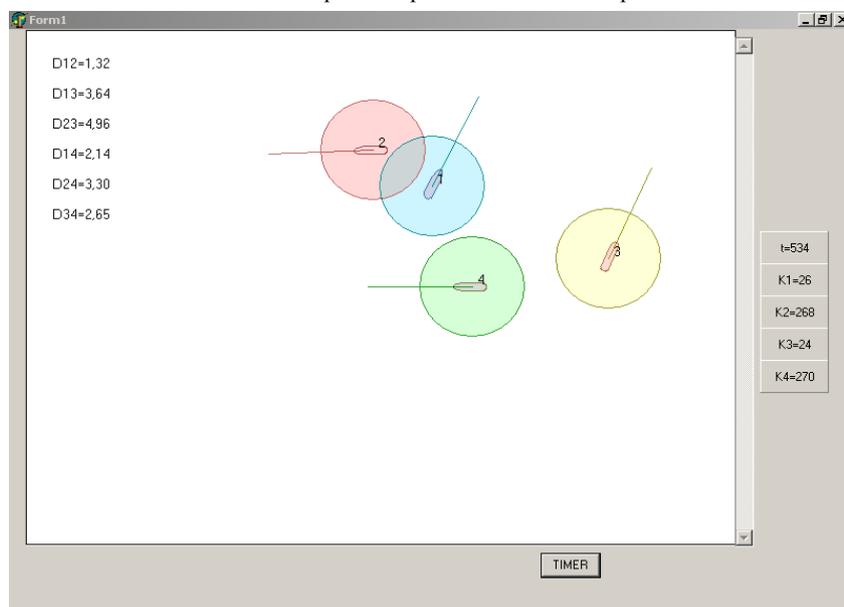


Рис. 9. Завершение процесса расхождения на 534 с времени

Выводы

1. Показано, что основным методом внешнего управления процессом расхождения судов являются области опасных курсов сближающихся судов, с помощью которых производится выбор маневра расхождения пары судов изменением их курсов.

2. Предложен метод выбора безопасных курсов уклонения в ситуации опасного сближения четырех судов,

когда все шесть ситуационных возмущений матрицы отличны от нуля. Приведены условия выбора безопасных курсов в терминах областей опасных парных курсов, что составляет научную новизну статьи.

3. Приведены численный пример безопасного расхождения четырех судов и результаты имитационного моделирования, подтверждающие корректность предложенного метода.

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. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / В. Е. Кудряшов // 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. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.
5. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э.Н. Пятаков, Р.Ю. Бужбецкий, 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. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э.Н. Пятаков., С.И. Заичко // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.15. - Одесса: "ИздательИнформ", 2008. – С. 166 – 171.
8. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н.Цымбал, И.А.Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
9. 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.
10. 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.
11. Булгаков А.Ю. Использование опасной области курсов двух судов для выбора допустимого маневра расхождения/ А.Ю. Булгаков// Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 12 – 17.

REFERENCES

1. Pavlov V.V. Some questions of choice of maneuver in the situations of divergence of vessels/ Pavlov V.V., Senshin N.I. // Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika. - 1985.- №68. - p. 43 - 45.
2. Kudryashov V.E. Synthesis of algorithms of safe management by a ship at divergence with a few objects/Kudryashov V.E. //Sudostroenie. - 1978.- №5.- p. 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. Kulikov A.M. Optimum management by divergence of vessels / Kulikov A.M., and Poddubnyy V.V.// Sudostroenie. -1984.- №12.- p. 22 - 24.
5. Pyatkov E.N. Cooperation of vessels at divergence for warning of collision / Pyatkov E.N., Buzhbeckij R.Y., Burmaka I.A., Bulgakov A. Y. - Kherson: Grin D. S.- 2015.- 312 p.
6. Vagushchenko L.L. Divergence with vessels by displacement on the parallel line of way / Vagushchenko L.L.- Odessa: Feniks.- 2013.- 180 p.
7. Pyatkov E. N. Estimation of efficiency of pair strategies of going away vessels / Pyatkov E. N., Zaichko S.I.// Sudovozhdenie.- 2008.- №15. - p. 166 – 171.
8. Tsimbal N.N. Flexible strategies of divergence of vessels/ Tsimbal N.N., Burmaka I.A. and Tyupikov E.E. - Odessa: KP OGT.- 2007.- 424 p.
9. Burmaka I.A. Maneuver of divergence of three vessels by the change of courses/ Burmaka I.A., Bulgakov A. Y.// Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. - 2014.- №20. - p. 18 - 23.
10. Burmaka I. Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement / Burmaka I., Pyatkov E., Bulgakov A.- LAP LAMBERT Academic Publishing, - Saarbryukken (Germany), – 2016. - 585 p.
11. Bulgakov A.Y. Use of dangerous region of courses of two vessels for the choice of possible maneuver of divergence/ Bulgakov A.Y.// Vodnyy transport.- 2014.- №2 (20).- p. 12 – 17.

Выбор стратегии расхождения группы судов методами внешнего управления

И. А. Бурмака

Аннотация. Показано, что основным методом внешнего управления процессом расхождения судов являются области опасных курсов сближающихся судов, с помощью которых производится выбор маневра расхождения пары судов. Показан метод выбора безопасных курсов расхождения в ситуации опасного сближения четырех судов. Приведен численный пример и результаты имитационного моделирования.

Ключевые слова: безопасность судовождения, расхождение судов при опасном сближении, внешнее управление процессом расхождения, области опасных курсов, безопасное расхождение группы судов.

The choice of strategy for the passing of a group of vessels by methods of external management

I. A. Burmaka

Abstract. It is shown that the main method of external control of the process of ship's passing are the areas of dangerous courses of approaching ships, with the help of which the manoeuvre of passing of a pair of vessels is selected. The method of choosing safe courses of discrepancy in the situation of the dangerous approach of four ships is shown. A numerical example and results of simulation modelling are given.

Keywords: safety of navigation, passing of ships in dangerous proximity, external management of the passing process, areas of dangerous courses, safe passing of a group of vessels.