

Выбор совместной стратегии расхождения судов изменением параметров движения при их внешнем управлении

И. А. Бурмака, С. С. Пасечнюк
<https://doi.org/10.31174/NT2018-158VI18-11>

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

Paper received 24.01.18; Accepted for publication 29.01.18.

Аннотация. Приведены аналитические выражения границ областей опасных курсов и опасных скоростей, с помощью которых осуществляется формирование данных областей при внешнем управлении процессом расхождения судов. Рассмотрены процедуры оценки опасности сближения судов и маневра их расхождения с помощью области опасных курсов и области их опасных скоростей. Получены формулы границ области недопустимых значений курсов одного судна и скоростей второго судна и предложена процедура ее графического отображения.

Ключевые слова: безопасность судоходства, расхождение судов, внешнее управление процессом расхождения, области опасных параметров движения судов.

Введение. Значительная часть эксплуатационного времени судов приходится на работу в стесненных условиях, где движение судна ограничено интенсивным судоходством и навигационными опасностями. Маневрирование судна в таких районах затруднено, и плавание производится по единственно безопасным, нередко весьма стесненным путям. Стесненные воды являются сложнейшими по своим условиям районами плавания, где в наибольшей степени проявляется человеческий фактор, который характеризует большую зависимость безопасности плавания от личных и профессиональных качеств судоводителей. В связи с этим стесненные районы плавания с особенно интенсивным движением оборудуются станциями управления движением судов (СУДС), предназначенных для контроля процесса судоходства и управления движением опасно сближающихся судов.

Для эффективной работы СУДС требуется их оснащение современными средствами предупреждения столкновения судов, которые используют способы безопасного расхождения двух и более судов. Поэтому исследование вопросов управления судами, следующими опасными курсами сближения, в районах контроля СУДС, чему посвящена настоящая статья, является актуальным и перспективным научным направлением, так как ведет к повышению безопасности мореплавания, а значит и к уменьшению вероятности человеческих жертв, экологических катастроф и экономических потерь из-за возможных аварий.

Краткий обзор публикаций по теме. В работах [1-4] предложены различные модели формализации взаимодействия судов при расхождении и процедуры расчета безопасного маневра.

В работе [1] глубоко и разносторонне исследована проблема предупреждения столкновений судов и предложен метод гибких стратегий их расхождения, позволяющий формировать оптимальную стратегию расхождения судна с несколькими опасными целями с учетом требований МППСС-72, имеющимися навигационными опасностями и инерционно-тормозными характеристиками судна.

Обобщению понятия взаимодействия судов при возникновении угрозы столкновения посвящена работа [2], в которой предложена формализация МППСС-72. Формализация взаимодействия судов при расхождении

в рамках теории дифференциальных игр производится в работах [3,4].

В публикации [5] представлена модель доменов судов для предотвращения многоточечного столкновения с принятием решений с помощью COLREG на основе поля искусственного потенциала. Рассмотрены методы принятия решений по предотвращению столкновений с несколькими судами и составление плана планирования маршрута. В этом документе предлагается полный набор решений для предотвращения столкновения между несколькими кораблями в интеллектуальной навигации, используя организацию «сверху вниз» для структурирования системы. Система разработана с двумя уровнями: принятие решений о предотвращении столкновений и планирование маршрута. В соответствии с общими требованиями Международных правил предотвращения столкновений на суше (COLREG), анализ принятия решений о распределении распределенных маршрутов для борьбы с столкновением анализируется как для ситуаций, связанных с движущимися судами, так и для стоящих судов, включая чрезвычайные действия в случае отката судна в уклонении от принятия мер по предотвращению столкновений. Метод искусственного потенциального поля (АПФ) используется для планирования пути в деталях. Разработанный метод АПФ в сочетании с моделью судовой области, учитывающих скорость и курс целевых судов, чтобы он мог более точно определять движущиеся характеристики препятствий. Результаты моделирования показывают, что предлагаемая система может работать эффективно.

В монографии [6] освещен ряд особенностей задачи расхождения судов в море и приведен метод предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути. Результаты исследования эффективности парных маневров расхождения приведены в работе [7].

Из-за неполной или доминирующей информации проблема столкновения судов или возникновения ситуаций опасного сближения судов на море, часто вызванных человеческой ошибкой, как отмечается в работе [8], с ростом морских перевозок становится все более и более важной. На принципах полного внешнего управления процессом расхождения судов рассмотрены основанные подходы формирования с помощью экспертных знаний безопасных траекторий

движения судов, которые поставляются судоводителям и службам движения судов. В статье, в отличие от этого, предлагается процедура планирования траекторий движения судов с использованием специализированных алгоритмов. Производится их согласования путем предварительных договоренностей, пока не будет найдено решение, которое будет приемлемым для всех судов, и будет удовлетворять правилам предотвращения столкновений, включая в себя динамическую модель всех судов и проведения переговоров с целью оптимизации траекторий без внешнего управления.

В работе [9] рассмотрено управления тремя судами для безопасного расхождения. Как указывается в публикации [10], СУДС, как правило, не имеет технических возможностей контролировать движение судов на участках их скопления для обеспечения безопасности судоходства. Как дополнение к средствам возможности уклонения от столкновения системы СУДС/АИС в статье предложен новый фuzzi-метод. Ввод данных СУДС совместно с данными АИС в Морскую географическую информационную систему MGIS (Marine Geographic Information System) дает платформу для расчета сведений об области нахождения судна, инерционных сил, действующих на судно, а также используется для определения модели защитного круга и опасного индекса. Используя аналитическую модель морской системы GIS может быть получено точное прогнозирование времени столкновения и позиции. Предложенный метод дает оператору СУДС возможность принятия решений по предупреждению столкновения судов.

При управлении процессом расхождения судов с помощью СУДС реализуется принцип внешнего управления процессом расхождения, особенности которого рассмотрены в данной статье.

Цель. Целью настоящей статьи является формирование процедуры выбора совместной стратегии расхождения изменением курса одного из судов и скорости другого судна при их внешнем управлении.

Материалы и методы. При внешнем управлении процессом расхождения наблюдается ситуация сближения пары судов и при появлении угрозы столкновения формируется стратегия расхождения общая для обоих судов.

В работе [11] представлена процедура формирования области опасных курсов Q_k , которая отображается на расширенной плоскости курсов судов, что показано на рис. 1. Совокупность точек курсов судов (K_1, K_2) , которые удовлетворяют уравнению:

$$\sin(K_2 - \varphi) = \frac{V_1}{V_2} \sin(K_1 - \varphi) \quad (1)$$

является границей области Q_k . В приведенном уравнении $\varphi = \alpha \pm \arcsin \frac{d_d}{D}$, α и D - соответственно пеленг и дистанция между судами, а d_d - предельно-допустимая дистанция сближения судов.

Как указывается в работе [11], если точка (K_1, K_2) находится внутри области опасных курсов Q_k , то дистанция кратчайшего сближения D_{min} меньше

предельно-допустимой дистанции D_d , поэтому сближение судов является опасным. В случае нахождения точки (K_1, K_2) на границе или вне области Q_k угроза столкновения отсутствует. Если точка с программными курсами (K_{10}, K_{20}) пары сближающихся судов находится в области Q_k , то необходимо изменить их курсы на значения K_{1y} и K_{2y} , сохраняя неизменными скорости, при которых точка (K_{1y}, K_{2y}) находится на границе области опасных курсов Q_k .

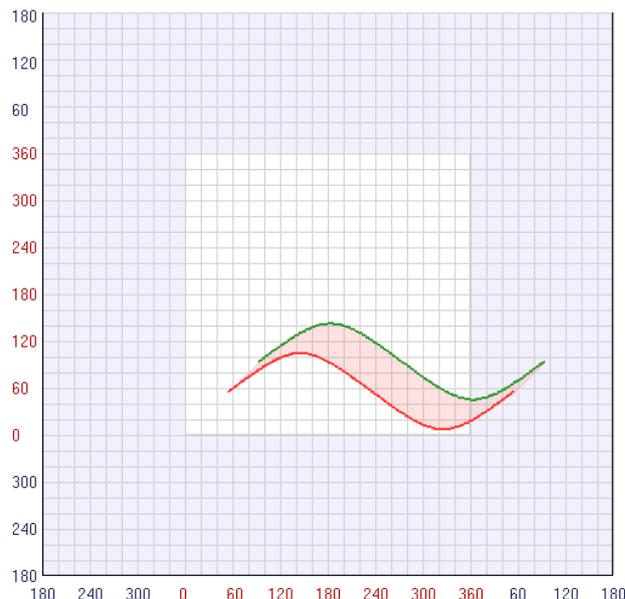


Рис.1. Область опасных курсов Q_k судов при $v_1 < v_2$

В стесненных водах существуют ситуации, в которых суда при опасном сближении не могут изменять свой курс, поэтому предупредить их столкновение можно только изменением скоростей. В работе [12] для таких ситуаций предложена область опасных скоростей Q_v , каждой точке (V_1, V_2) которой соответствует дистанция кратчайшего сближения между судами D_{min} . В работе [12] показано, что граница опасной области скоростей, каждая точка которой соответствует дистанции кратчайшего сближения равной предельно-допустимой дистанции, т. е. $D_{min} = D_d$, формализуется выражениями:

$$V_1^* = V_2 \frac{\sin(K_2 - \gamma^*)}{\sin(K_1 - \gamma^*)}, \quad V_{1*} = V_2 \frac{\sin(K_2 - \gamma_*)}{\sin(K_1 - \gamma_*)}$$

где $\gamma^* = \alpha - \arcsin \frac{d_d}{D}$, $\gamma_* = \alpha + \arcsin \frac{d_d}{D}$.

Очевидно, при постоянных значениях курсов K_1, K_2 и параметров γ^*, γ_* границы опасной области скоростей являются линейными. На рис. 2 показана область недопустимых скоростей для пары опасных сближающихся судов, курсы которых являются неизменными. В качестве примера выбрана ситуация опасного сближения судов с параметрами: $\alpha = 90^\circ$, $D = 3,0$ мили, $d_d = 1,0$ мили, $K_1 = 45^\circ$, $K_2 = 315^\circ$, с начальными скоростями $V_1 = 15$ узлов и $V_2 = 15$ узлов.

В этом случае $\gamma^* = 70,5^\circ$ и $\gamma_* = 109,5^\circ$, а выражения для верхней $Gr^*(V_1, V_2)$ и нижней $Gr_*(V_1, V_2)$ границ:

$$V_1^* = 2,097V_2 \text{ и } V_{1*} = 0,477V_2.$$

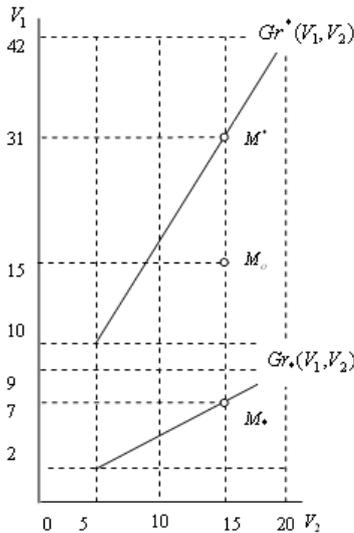


Рис. 2. Область Q_v недопустимых скоростей

Как следует из приведенного рис. 2, точка с начальными скоростями M_0 принадлежит области недопустимых скоростей и сближение судов опасное. Если судно, имеющее скорость V_2 следует с неизменными параметрами, а судно со скоростью V_1 будет маневрировать изменением скорости, то безопасное расхождение на дистанции $d_d = 1,0$ мили возможно при увеличении скорости V_1 до значения

$$V_2^{(1)} = \frac{\sin(K_1 - \gamma^{(1)})}{\mu^{(1)}} = \frac{V_1}{\sin[K_2 - (\alpha + \arcsin \frac{d_d}{D})]} \sin[K_1 - (\alpha - \arcsin \frac{d_d}{D})],$$

$$V_2^{(2)} = \frac{\sin(K_1 - \gamma^{(2)})}{\mu^{(2)}} = \frac{V_1}{\sin[K_2 - (\alpha - \arcsin \frac{d_d}{D})]} \sin[K_1 - (\alpha + \arcsin \frac{d_d}{D})]. \quad (2)$$

При изменении скорости торможением значения скоростей $V_2^{(1,2)}$ должны удовлетворять условию $V_{2n} > V_2^{(1,2)} \geq 0$, где V_{2n} - начальная скорость судна. Обращаем внимание, что граничным значениям 0 и V_{2n} скорости $V_2^{(1,2)}$ соответствуют, согласно (2) следующие значения курса K_1 :

$$K_1(V_2^{(1,2)} = 0) = \alpha \mp \arcsin \frac{d_d}{D} = \gamma^{(1,2)},$$

$$K_1(V_2^{(1,2)} = V_{2n}) = \gamma^{(1,2)} + \arcsin[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})].$$

Рассмотрим случай, когда $V_1 > V_{2n}$ и найдем граничные значения курса первого судна

31,5 узла (точка M^*) или ее уменьшении до значения 7,2 узла (точка M_*). Указанные точки находятся на верхней $Gr^*(V_1, V_2)$ и нижней $Gr_*(V_1, V_2)$ границах области опасных скоростей.

Если изменение скорости V_1 до указанных пределов возможно практически мгновенно, то значения дистанции D и пеленга α не изменяются и суда расходятся на заданной предельно-допустимой дистанции. Однако, из-за инерционности судна для изменения скорости судна V_1 до необходимых значений требуется некоторый интервал времени.

Результаты и их обсуждение. Отметим, что возможности безопасного расхождения опасно сближающихся судов возрастают при использовании маневра расхождения, при котором одно из судов изменяет курс, сохраняя неизменной скорость, а второе судно на постоянном курсе может снижать свою скорость. Аналогично предыдущим случаям целесообразно рассмотреть область Ω_{kv} на плоскости $K_1 \times V_2$, границу которой составляют точки (K_1, V_2) , удовлетворяющие условию $\min D(K_1, V_2) = d_d$.

Из выражения (1), с учетом обозначения $\gamma^{(1,2)} = \alpha \mp \arcsin(\frac{d_d}{D})$, граница области Ω_{kv} аналитически описывается с помощью формулы:

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

Обозначая $\mu^{(1,2)} = \frac{\sin(K_2 - \gamma^{(1,2)})}{V_1}$, получим

$$V_2^{(1,2)} = \frac{\sin(K_1 - \gamma^{(1,2)})}{\mu^{(1,2)}}. \text{ Откуда следует, что существует}$$

две границы, на которых достигается равенство $\min D = d_d$:

$$K_1(V_2^{(1)} = 0) = \alpha - \arcsin \frac{d_d}{D} = \gamma^{(1)};$$

$$K_1(V_2^{(2)} = 0) = \alpha + \arcsin \frac{d_d}{D} = \gamma^{(2)};$$

$$K_1(V_2^{(1)} = V_{2n}) = \gamma^{(1)} + \arcsin[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1)})];$$

$$K_1(V_2^{(2)} = V_{2n}) = \gamma^{(2)} + \arcsin[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(2)})].$$

Для удобства дальнейшего изложения введем следующие обозначения:

$$K_{1\min}^{(1)} = K_1(V_2^{(1)} = 0), \quad K_{1\min}^{(2)} = K_1(V_2^{(2)} = 0),$$

$$K_{1\max}^{(1)} = K_1(V_2^{(1)} = V_{2n}), \quad K_{1\max}^{(2)} = K_1(V_2^{(2)} = V_{2n}).$$

Поэтому с учетом принятых обозначений получим следующие выражения:

$$K_{1min}^{(1)} = \alpha - \arcsin \frac{d_d}{D} = \gamma^{(1)},$$

$$K_{1min}^{(2)} = \alpha + \arcsin \frac{d_d}{D} = \gamma^{(2)},$$

$$K_{1max}^{(1)} = \gamma^{(1)} + \arcsin \left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1)}) \right],$$

$$K_{1max}^{(2)} = \gamma^{(2)} + \arcsin \left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(2)}) \right].$$

Изменение скорости второго судна V_2 при $V_2 \in (0, V_{2n})$ для первой границы происходит на участке курсов $K_1 \in (K_{1min}^{(1)}, K_{1max}^{(1)})$, т. е. на интервале $\Delta K_1^{(1)} = K_{1max}^{(1)} - K_{1min}^{(1)}$ или с учетом полученных выражений $\Delta K_1^{(1)} = \arcsin \left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(1)}) \right]$. Также для второй границы: $K_1 \in (K_{1min}^{(2)}, K_{1max}^{(2)})$ и $\Delta K_1^{(2)} = \arcsin \left[\frac{V_{2n}}{V_1} \sin(K_2 - \gamma^{(2)}) \right]$. Отметим, что оба интервала $\Delta K_1^{(1)}$ и $\Delta K_1^{(2)}$ меньше $\pi/2$, следовательно, на этих интервалах значение скорости V_2 для обеих границ монотонно возрастает. Область Ω_{kv} опасных параметров курса одного судна и скорости второго судна, заключенная между первой границами для случая $V_1 > V_{2n}$ в общем случае имеет вид, показанный на рис. 3. Если точка с начальными параметрами движения судов $M_n(K_{n1}, V_{2n})$ находится между первой Cr_1 и второй Cr_2 границами, т. е. $(K_{n1}, V_{2n}) \in \Omega_{kv}$, то справедливо неравенство $\min D(K_{n1}, V_{2n}) < d_d$, и сближение судов является опасным. В этом случае необходимо выбрать

параметры уклонения судов K_{1y} и V_{2y} , так, чтобы соответствующая им точка $M_y(K_{1y}, V_{2y})$ находилась на ближайшей к точке $M_n(K_{n1}, V_{2n})$ границе области Ω_{kv} и расстояние между точками M_n и M_y было минимальным, как показано на рис. 3.

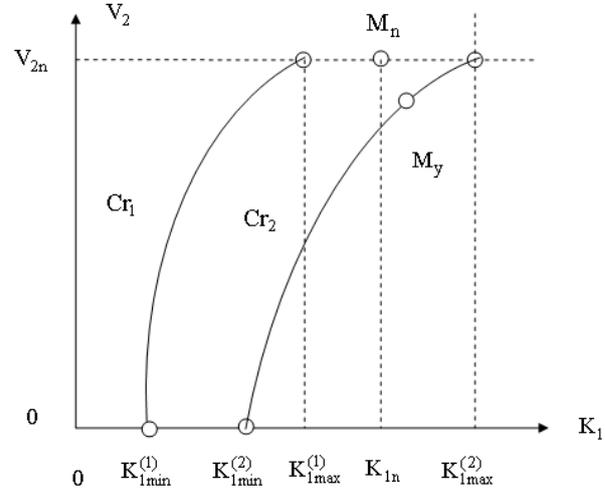


Рис. 3. Область Ω_{kv} опасных параметров судов

Выводы. 1. Приведены аналитические выражения границ областей опасных курсов и опасных скоростей, с помощью которых осуществляется формирование указанных областей. 2. Рассмотрены способы оценки опасности сближения судов с помощью области опасных курсов и области их опасных скоростей при внешнем управлении процессом расхождения. Приведены процедуры выбора маневра их расхождения. 3. Получены формулы границ области недопустимых значений курсов одного судна и скоростей второго судна и предложена процедура ее графического отображения.

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 / Э.Н. Пятаков, Р.Ю. Бужбецкий, И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков - Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.
3. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / В. Е. Кудряшов // Судостроение. - 1978.- №5. - С. 35-40.
4. 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.
5. 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.
6. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. - Одесса: Феникс, 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: "ИздатИнформ", 2008. - С. 166 - 171.
8. 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.
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. 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.
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.
12. 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.

REFERENCES

1. 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.
2. Pyatakov E.N. Cooperation of vessels at divergence for warning of collision / Pyatakov E.N., Buzhbeckij R.Y., Burmaka I.A., Bulgakov A. Y. - Kherson: Grin D. S.- 2015.- 312 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Vagushchenko L.L. Divergence with vessels by displacement on the parallel line of way / Vagushchenko L.L.- Odessa: Feniks.- 2013.- 180 p.
7. Pyatakov E. N. Estimation of efficiency of pair strategies of going away vessels / Pyatakov E. N., Zaichko S.I.// Sudovozhdenie.- 2008.- №15.- p. 166 – 171.
8. 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.
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. 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.
11. Bulgakov A.Y. Use of dangerous region of courses of two vessels for the choice of possible manoeuvre of divergence/ Bulgakov A.Y.// Vodnyy transport.- 2014.- №2 (20).- p. 12 – 17.
12. Burmaka I. Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement / Burmaka I., Pyatakov E., Bulgakov A.- LAP LAMBERT Academic Publishing, - Saarbrücken (Germany), – 2016. - 585 p.

Выбор совместной стратегии расхождения судов изменением параметров движения при их внешнем управлении И. А. Бурмака, С. С. Пасечнюк

Аннотация. Приведены аналитические выражения границ областей опасных курсов и опасных скоростей, с помощью которых осуществляется формирование данных областей при внешнем управлении процессом расхождения судов. Рассмотрены процедуры оценки опасности сближения судов и маневра их расхождения с помощью области опасных курсов и области их опасных скоростей. Получены формулы границ области недопустимых значений курсов одного судна и скоростей второго судна и предложена процедура ее графического отображения.

Ключевые слова: безопасность судовождения, расхождение судов, внешнее управление процессом расхождения, области опасных параметров движения судов.

Choice of joint strategy of divergence of vessels by the change of parameters of motion at their external management I. A. Burmaka, S. S. Pasechnyuk

Abstract. Analytical expressions of scopes of regions of dangerous courses and dangerous speeds are resulted, which forming of these regions at the external process control of divergence of vessels is carried out by. Procedures of estimation of danger of rapprochement of vessels and maneuver of their divergence by the region of dangerous courses and region of their dangerous speeds are considered. The formulas of scopes of region of impermissible values of courses of one ship and speeds of the second ship are got and procedure of its graphic reflection is offered.

Keywords: safety of navigator, divergence of vessels, external process control of divergence, region of dangerous parameters of motion of vessels.