

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ И АНАЛИЗ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Хуссейн Ю. М., аспирант Национального университета «Одесская морская академия»;
Янчекский А. В., аспирант Национального университета «Одесская морская академия»

Статья посвящена анализу наиболее перспективных и эффективных локально-независимых способов расхождения судов для формирования системы автоматического предупреждения столкновений, обеспечивающую безопасность перспективных автономных судов.

Рассмотрены этапы процесса принятия решения по необходимости расхождения судов при их сближении и выбору стратегии расхождения. Приведены аналитические выражения для формализации предложенных этапов процесса принятия решения по необходимости расхождения судов. В качестве показателя эффективности аналитических систем предупреждения столкновений судов предложена вероятность безопасного завершения процесса расхождения, которая является произведением вероятностей успешного исхода этапов процесса принятия решения по выбору стратегии расхождения.

Для системы автоматического предупреждения столкновений предложены методы расхождения с одной опасной целью изменением курса или скорости судна и с двумя опасными целями комбинированным маневром повторного изменения курса судна.

Ключевые слова: безопасность судовождения, процесс расхождения судов, локально-независимое управление, область недопустимых параметров.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.1.22.054-063

Постановка проблемы. Снижение аварийности судов из-за их столкновений при плавании в стесненных водах является актуальной проблемой. Основным принципом управления процессом расхождения судов при их опасном сближении является локально-независимое управление, при котором каждое из судов контролирует текущую ситуацию сближения.

Интенсивные исследования по созданию автономных судов, которые проводятся в настоящее время, для их безопасного плавания требуют разработки системы автоматического предупреждения столкновений судов, использующей принцип локально-независимого управления. Для функционирования такой системы следует произвести выбор наиболее эффективных способов расхождения судна с целью изменения курса или скорости. Так как сейчас разработаны различные аналитические системы предупреждения столкновений судов, то необходимо разработать способ сравнительного анализа их эффективности. Также требуется использование комбинированных методов расхождения судна с двумя опасными целями. Анализ наиболее перспективных и эффективных способов расхождения судов для формирования системы автоматического предупреждения столкновений является актуальным научным направлением, чем и обусловлена тематика статьи.

Анализ последних достижений и публикаций. В работе [1] рассмотрены взаимодействия судов при опасном сближении и выбор стратегии расхождения для предупреждения их столкновения, а в работе [2] приведено подробное исследование методов локально-независимого управления, причем для расхождения оперирующего судна с несколькими опасными целями предложен метод формирования гибких стратегий расхождения. Выбор оптимального стандартного маневра расхождения пары судов рассмотрен в работе [3], а в работе [4] рассмотрены принципы локально-независимого и внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов. В работе [5] предложена экстренная стратегия расхождения в ситуации чрезмерного сближения судов, а в работах [6,7] освещены вопросы учета навигационных опасностей и инерционности судна при выборе стратегии расхождения судна.

Работа [8] посвящена автономной судовой системе уклонения от столкновения, в которой рассматриваются требования к автономной навигации и указывается, что исследования по автоматизации управления судном могут быть представлены

в классической или компьютерной категориях. При теоретическом направлении работа не содержит рекомендаций практическому судовождению.

В работе [9] предложено описание процесса расхождения судов в терминах дифференциальной антагонистической игры.

В работе [10] рассмотрено управление тремя судами для безопасного расхождения, а результаты исследования эффективности парных маневров расхождения приведены в работе [11]. Ряд особенностей задачи расхождения судов в море освещен в монографии [12], в которой приведен метод предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути.

Цель статьи. Целью настоящей статьи является анализ наиболее перспективных и эффективных локально-независимых способов расхождения судов для формирования системы автоматического предупреждения столкновений.

Изложение основного материала. Для реализации поставленной в статье цели, прежде всего, следует разработать метод оценки их эффективности, который должен характеризовать степень безопасности завершения процесса расхождения судов, начиная с момента обнаружения ситуации опасного сближения.

В работах [1, 4] предложены к использованию различные аналитические системы предупреждения столкновений судов при локально-независимом управлении их процессом расхождения, для сравнительного анализа которых следует рассмотреть составляющие процесса принятия решения по необходимости расхождения судов при их сближении и, в случае ее наличия, выбору стратегии расхождения. Процесс принятия решения содержит следующие этапы:

- Контроль за окружающей обстановкой, включая относительную позицию и параметры относительного движения;
- выявление ситуации сближения судов;
- при сближении судов следует произвести оценку степени его опасности;
- в зависимости от степени опасности ситуации сближения выбор стратегии расхождения.

На первом этапе процесса принятия решения с помощью САРП или АИС выявляются окружающие подвижные объекты, для которых измеряются параметры движения и относительного положения. На этом этапе определяются относительный курс K_{ot} и скорость V_{ot} с помощью выражений:

$$K_{ot} = \arcsin[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)/V_{ot}];$$

$$V_{ot} = [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)]^{1/2},$$

где K_1 , V_1 , K_2 и V_2 – параметры движения судов.

На втором этапе процесса принятия решения, используя измеренные параметры, необходимо рассчитать значение скорости изменения дистанции между судами \dot{D} , учитывая, что при ее отрицательном значении суда сближаются. Значение скорости изменения дистанции между судами рассчитывается с помощью выражения:

$$\dot{D} = -V_{ot} \cos(\alpha - K_{ot}),$$

где α – пеленг с одного судна на другое судно.

На третьем этапе процесса принятия решения при сближении судов производится оценка степени его опасности, для чего прогнозируется развитие ситуации сближения до момента времени их кратчайшего сближения, которое характеризуется дистанцией D_{min} :

$$D_{min} = |D \sin(\alpha - K_{ot})|,$$

где D – дистанция между судами.

Степень опасности сближения судов характеризуется ситуационным возмущением ω , которое возникает при прогнозируемом попадании судов в домен недопустимых

позицій. Оно возникает тогда, когда прогнозируемое значение дистанции кратчайшего сближения D_{\min} меньше значения предельно-допустимой дистанции сближения D_d , величина которой зависит от формы домена недопустимых позиций и ракурса сближения судов. При опасном сближении ситуационное возмущение ω может принимать значения 1 или 2.

Поэтому на четвертом этапе принятия решения в зависимости от степени опасности ситуации сближения, т. е. значения ситуационного возмущения $\omega > 0$, следует выбрать стратегию расхождения, исходя из координации маневров сближающихся судов, предусмотренной МППСС-72. Характер маневра расхождения также определяется значением ситуационного возмущения. В случае $\omega = 1$ предусмотрено применение стандартного маневра расхождения, а при значении $\omega = 2$, что характерно для чрезмерного сближения судов, во избежание столкновения следует использовать маневр экстренного расхождения.

Принципиально важным является число опасно сближающихся судов. В случае, когда опасно сближаются более двух судов, стратегия расхождения формируется с учетом матрицы ситуационного возмущения, которая в качестве элемента содержит значение ситуационного возмущения соответствующей пары судов.

В качестве показателя эффективности аналитических систем предупреждения столкновений судов целесообразно предложить вероятность безопасного завершения процесса расхождения P_s , которая является произведением вероятностей P_i успешного исхода этапов процесса принятия решения по выбору стратегии расхождения:

$$P_s = P_1 P_2 P_3 P_4.$$

В настоящее время проводятся интенсивные исследования по созданию автономных судов, для безопасного плавания которых необходима разработка системы автоматического предупреждения столкновений судов. Для функционирования такой системы следует произвести выбор способов расхождения судна с целью изменения курса или скорости. Также требуется использование комбинированных методов расхождения судна с двумя опасными целями.

Для системы автоматического предупреждения столкновений необходимо рассмотреть методы расхождения следующих типов:

- с одной опасной целью изменением курса судна;
- с одной опасной целью изменением скорости судна;
- с одной опасной целью изменением курса и скорости судна;
- с двумя опасными целями комбинированным маневром повторного изменения курса.

Проведя предварительный анализ, были предложены перспективные, наиболее эффективные способы упомянутых типов маневров расхождения.

В работе [4] указывается, что для предупреждения столкновения судов используется стандартный маневр расхождения изменением курса, который содержит два участка: участок уклонения с программной траектории движения, который характеризуется курсом уклонения K_y и моментом времени начала уклонения t_y , а также участок выхода на заданную (программную) траекторию движения с параметрами K_b – курсом выхода и t_b – моментом поворота на курс выхода. Заключительной характеристикой маневра расхождения является время t_k и курс K_k поворота судна с участка выхода на программную траекторию и конечный программный курс.

В работе [13] для оперативного выбора параметров маневра расхождения судна с целью предложены области недопустимых значений параметров уклонения $Q_{K,ty}$ и области $Q_{K,tb}$ допустимых значений параметров уклонения и выхода, которые показаны на рис. 1.

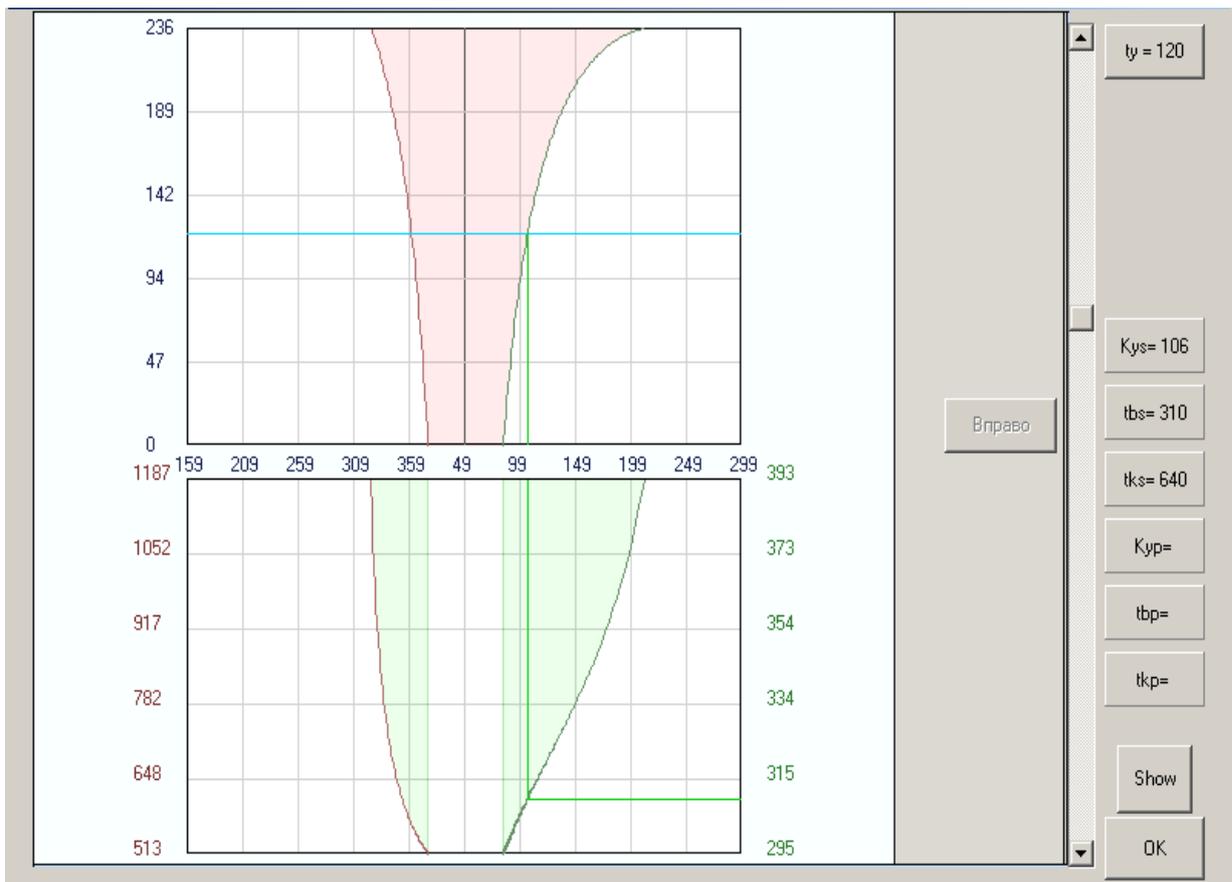
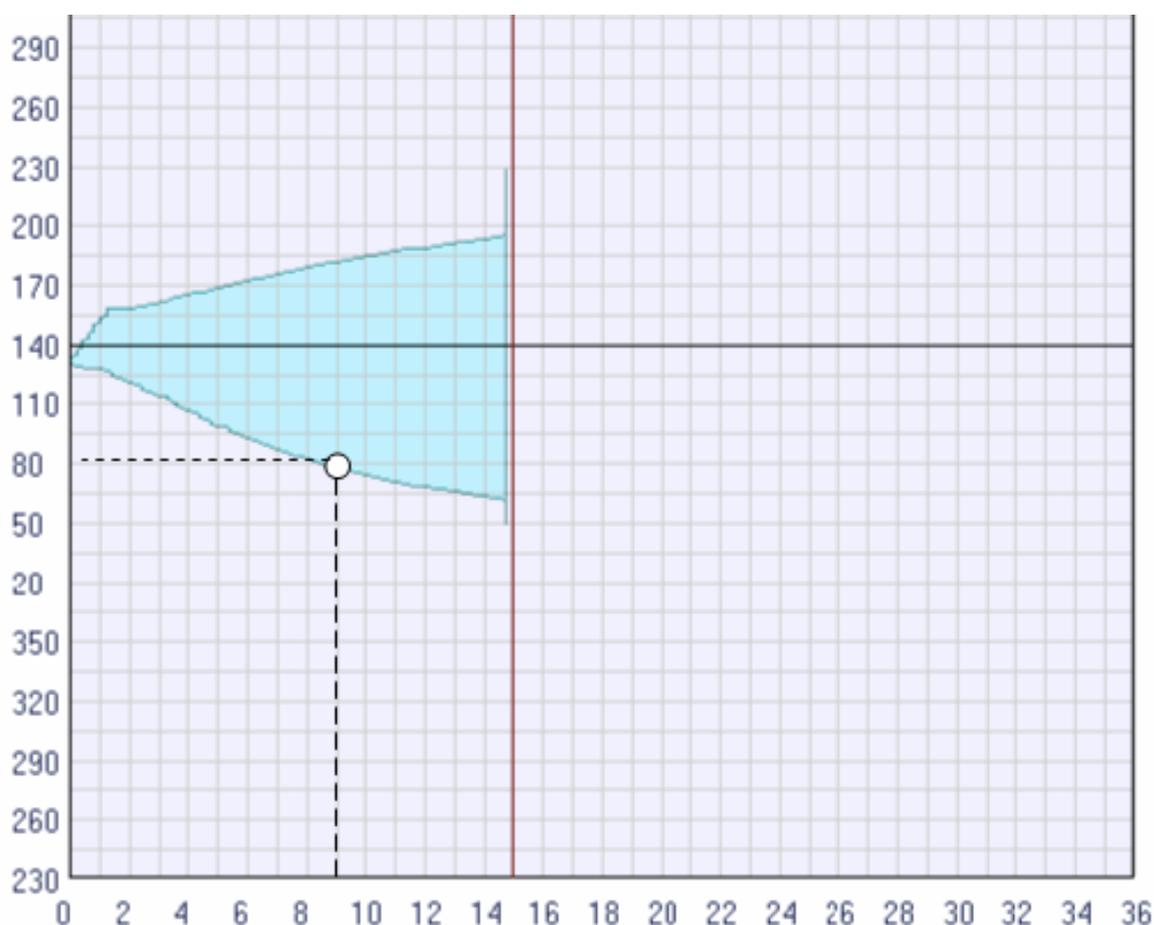


Рисунок 1 – Выбор параметров маневра расхождения

Значение курса уклонения на рис. 1 индицируется вертикальной линией на обеих областях и выводится на информационное табло. В приводимом примере $t_y = 120$ с $K_y = 106^\circ$. Одновременно с изменением t_y на нижней области горизонтальной линией индицируется значение t_b и его значение выводится на панель, в данном примере $t_b = 310$ с. Программой также рассчитывается значение времени t_k достижения судном программной траектории движения и выводится на панель (для примера $t_k = 640$ с).

Для случая выбора маневра расхождения судна снижением скорости активным или пассивным торможением в работе [14] предложен метод формирования области Θ_{dV} и расчета ее границ, для чего была разработана компьютерная программа.

Опасная область Θ_{dV} для активного торможения показана на рис. 2, из которого следует, что при неизменном начальном курсе судна $K_1 = 140^\circ$ безопасное расхождение с целью возможно при снижении скорости активным торможением до величины 0,4 узла, т. е. практически остановкой судна.

Рисунок 2 – Опасная область Θ_{dV} при активном торможении судна

В случае необходимости расхождения судна с целью изменением курса и скорости можно также применить область Θ_{dV} , на границе которой выбирается точка, соответствующая выбранному курсу и на оси скоростей получим соответствующую скорость. В качестве примера на рис. 2 выбран курс 80° , которому соответствует скорость 9 узлов, полученная активным торможением.

В ситуации опасного сближения судна с двумя целями для оперативного выбора параметров маневра расхождения судна в работе [15] предложено сформировать область допустимых значений последовательных курсов уклонения $\nabla_{K1,K2}$.

Граница этой области рассчитывается для курсов первого уклонения в пределах от $K_c \pm 5$ до $K_c \pm 90$. По условию минимального отклонения от программной траектории движения судна второй курс уклонения выбирается в пределах от $K_c \mp 30$ до $K_c \mp 5$, следовательно, $K_{y2} \in [K_c \mp 30, K_c \mp 5]$.

Компьютерной программой была рассчитана граница области $\nabla_{K1,K2}$, которая показана на рис. 3.

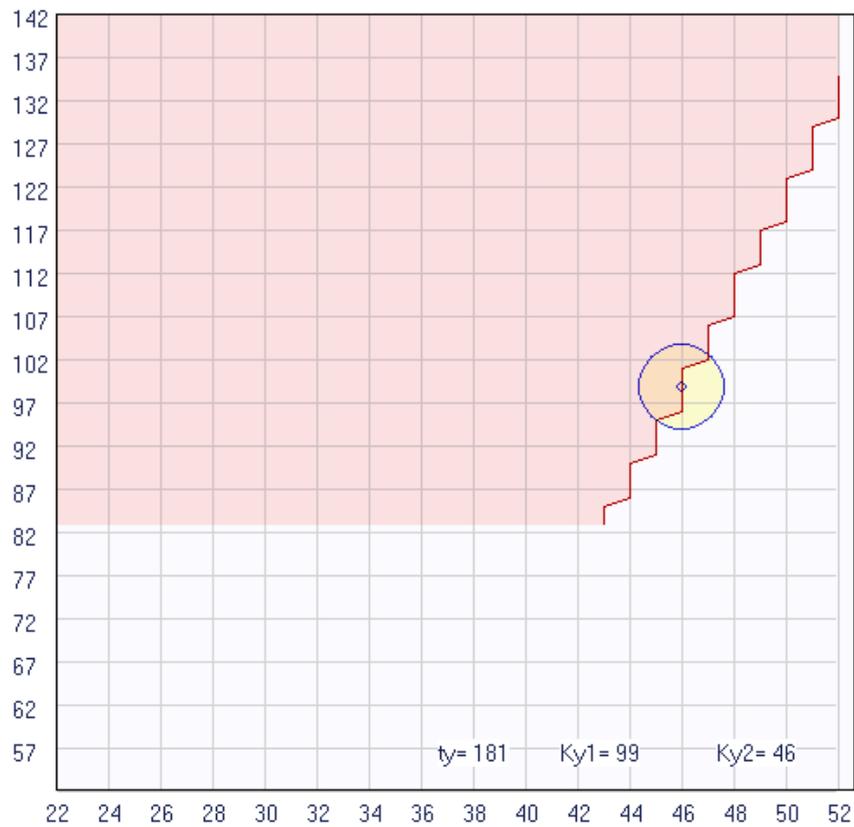


Рисунок 3 – Выбор произвольной точки границы области $\nabla_{K1,K2}$

Если на границе выбрать произвольную точку, как показано на рис. 3, и «кликнуть» ее, то программой выводятся значения курсов и время поворота. Относительные траектории расхождения судна с каждой из целей показаны на рис. 4.

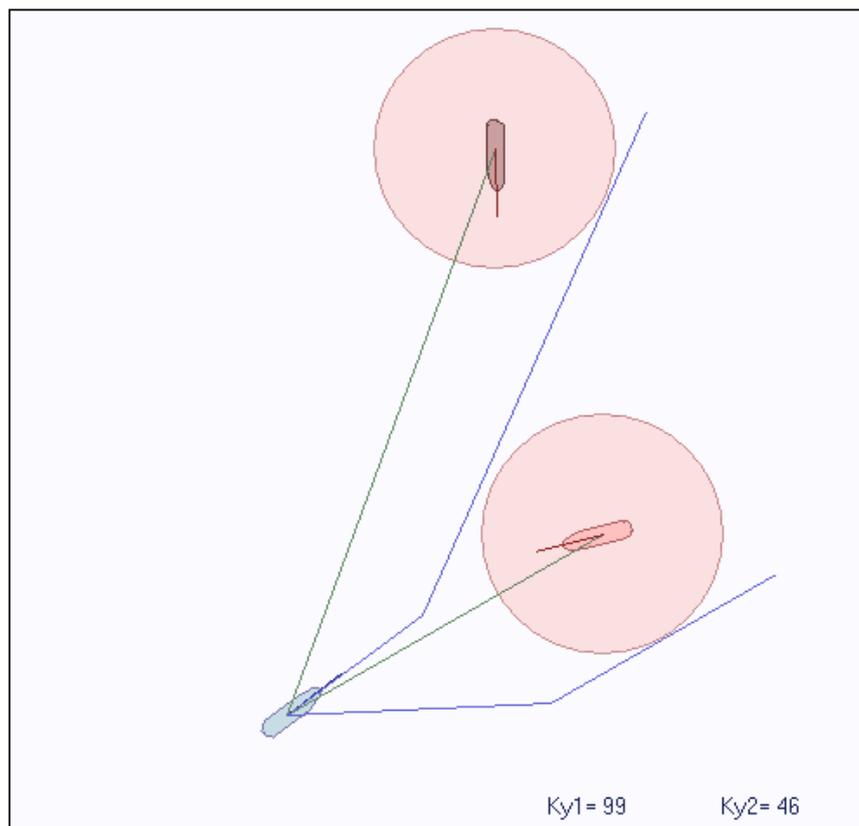


Рисунок 4 – Относительные траектории расхождения судна

Выводы

1. Рассмотрен процесс принятия решения по выбору стратегии расхождения судов и описаны его четыре этапа, а также предложен показатель оценки эффективности аналитических систем предупреждения столкновений судов, который позволяет произвести их сравнительную характеристику.

2. Предложены наиболее приемлемые эффективные способы расхождения судов для локально-независимого управления, которые целесообразно использовать в системе автоматического предупреждения столкновений автономных судов.

3. Представлены примеры применения рассмотренных способов расхождения судов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пятаков Э. Н., Бужбецкий Р. Ю., Бурмака И. А., Булгаков А. Ю. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения. Херсон : Гринь Д.С., 2015. 312 с.

2. Цымбал Н. Н., Бурмака И. А., Тюпиков Е. Е. Гибкие стратегии расхождения судов. Одесса : КП ОГТ, 2007. 424 с.

3. Сафин И. В. Выбор оптимального маневра расхождения. *Автоматизация судовых технических средств*. 2002. № 7. С. 115–120.

4. Бурмака И. А., Пятаков Э. Н., Булгаков А. Ю. Управление судами в ситуации опасного сближения. Саарбрюккен (Германия) : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 585 с.

5. Бурмака И. А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р. Ю. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 202 с.

6. Петриченко Е. А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей. *Судовождение*. 2003. №.6. С. 103–107.

7. Бурмака И. А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики. *Судовождение*. 2005. № 10. С. 21–25.

8. Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques. *J. Navig.* 2008. 61, № 1. P. 129–142.

9. Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety*. Gdańsk, 2005. P. 71–78.

10. Бурмака И. А., Булгаков А. Ю. Маневр расхождения трех судов изменением курсов. *Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб.* Одесса : ОНМА, 2014. Вып. 20. С. 18–23.

11. Пятаков Э. Н., Заичко С. И. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов. *Судовождение: сб. научн. трудов*. Одесса : «ИздатИнформ», 2008. Вып.15. С. 166–171.

12. Вагущенко Л. Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути. Одесса : Фенікс, 2013. 180 с.

13. Петриченко О. А. Оперативный способ определения параметров маневра расхождения судна. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. VI(22), Issue: 186, 2018. С. 68–71.

14. Волков Е. Л. Использование областей недопустимых значений параметров движения судна при локально-независимом управлении процессом расхождения. *East European Science Journal*. 2017. № 11 (27), Part 1. P. 14–24.

15. Пятаков Э. Н., Пятаков В. Э., Омельченко Т. Ю. Способ определения безопасного маневра расхождения судна изменением курса в ситуации опасного сближения с двумя

целями. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, 2018. VI(18), Issue: 158. С. 72–76.

REFERENCES

1. Pyatakov E., Pyatakov E., Buzhbetskiy R., Burmaka I., Bulgakov A. (2015). *Cooperation of vessels at divergence for warning of collision*. Kherson : Grin D.S.
2. Tsymbal N., Burmaka I., Tyupikov E. (2007). *Flexible strategies of divergence of vessels*. Odessa : KP OGT
3. Safin I. V. (2007). Choice of optimum maneuver of divergence. *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv*, 7, 115–120.
4. Burmaka I., Pyatakov E., Bulgakov A. (2016). *Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement*. LAP LAMBERT Academic Publishing. Germany, Saarbrücken.
5. Burmaka I., Burmaka A., Buzhbetskiy R. (2014). *Urgent strategy of divergence at excessive rapprochement of vessels*. LAP LAMBERT Academic Publishing.
6. Petrichenko E. A. (2003). Conclusion of condition of existence of great number of possible manoeuvres of divergence taking into account navigation dangers. *Sudovozhdenie*, 6, 103–107.
7. Burmaka Y.A. (2005). Results of imitation design of process of divergence of vessels taking into account their dynamics. *Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov*, 10, 21–25.
8. Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. (2008). Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques. *J. Navig*, 61, № 1, 129–142.
9. Lisowski J. (2005). Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety*. Gdańsk. 71–78.
10. Burmaka I. A., Bulgakov A. Y. (2014). Maneuver of divergence of three vessels by the change of courses. *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv*, 20, 18–23.
11. Pyatakov E. N., Zaichko S. I. (2008). Estimation of efficiency of pair strategies of going away vessels. *Sudovozhdenie*, 15, 166–171.
12. Vagushchenko L. L. (2013). *Divergence with vessels by displacement on the parallel line of way*. Odessa : Feniks.
13. Petrichenko O. A. (2018). Operative method of determination of parameters of manoeuvre of divergence of ship. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI (22), Issue: 186, 68–71.
14. Volkov E. L. (2017). Use of regions of impermissible values of parameters of motion of ship at the locally-independent process control of divergence. *East European Science Journal*, 11 (27), part 1, 14–24.
15. Pyatakov E. N., Pyatakov V. E., Omelchenko T. Yu. (2018). Method of determination of safe manoeuvre of divergence of ship by the change of course in the situation of dangerous rapprochement with two целями. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI(18), Issue: 158, 72–76.

Хуссейн Ю. М., Янчецький О. В. ПЕРСПЕКТИВНІ СПОСОБИ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН І АНАЛІЗ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

Стаття присвячена аналізу перспективних і найбільш ефективних локально-незалежних способів розходження суден для формування системи автоматичного попередження зіткнень, що забезпечує безпеку перспективних автономних суден.

Запропоновано розробку методу оцінки ефективності способів розходження суден, який характеризує ступінь безпеки завершення процесу розходження суден, починаючи з моменту виявлення ситуації небезпечного зближення.

Розглянуто етапи процесу прийняття рішення з потреби розходження суден при їх зближенні і вибору стратегії розходження. Показано, що процес прийняття рішення має наступні етапи: контроль навколишнього оточення, включаючи відносну позицію і параметри відносного руху, виявлення ситуації зближення суден, оцінка ступеня небезпеки зближення і вибір стратегії розходження.

Наведено аналітичні вирази для формалізації запропонованих етапів процесу прийняття рішення з потреби розходження суден.

Показано, що залежно від ступеня небезпеки ситуації зближення, слід вибрати стратегію розходження, виходячи з координації маневрів суден, що зближуються, яка передбачена МППЗС-72. Причому характер маневру розходження також визначається значенням ситуативного збурення. Зазвичай, передбачено застосування стандартного маневру розходження, а в ситуації надмірного зближення суден, щоб уникнути зіткнення, слід використовувати маневр екстреного розходження. Як показник ефективності аналітичних систем попередження зіткнень суден запропоновано вірогідність безпечного завершення процесу розходження, яка є добутком вірогідності успішного результату етапів процесу прийняття рішення по вибору стратегії розходження.

Для системи автоматичного попередження зіткнень запропоновано методи розходження з однією небезпечною ціллю зміною курсу або швидкості судна і з двома небезпечними цілями комбінованим маневром повторної зміни курсу судна.

Після попереднього аналізу були запропоновані перспективні найефективніші способи згаданих типів маневрів розходження.

Для оперативного вибору параметрів маневру розходження судна з ціллю запропоновано області неприпустимих значень параметрів ухилення і області допустимих значень параметрів ухилення і виходу. Для випадку вибору маневру розходження судна зниженням швидкості активним або пасивним гальмуванням запропоновано метод формування області неприпустимих швидкостей і розрахунку її меж.

У ситуації небезпечного зближення судна з двома цілями для оперативного вибору параметрів маневру розходження судна в роботі запропоновано сформувати область допустимих значень послідовних курсів ухилення.

Ключові слова: безпека судноводіння, процес розходження суден, локально незалежне управління, області неприпустимих параметрів.

Khussein Yu. M., Yanchetsky O. V. PERSPECTIVE METHODS OF DIVERGENCE OF VESSELS AND ANALYSIS OF THEIR EFFICIENCY

The article is devoted to the analysis of the most perspective and effective locally-independent methods of divergence of vessels for forming of the system of the automatic warning of collisions, providing safety of perspective autonomous vessels.

Development of method of estimation of efficiency of methods of divergence of vessels, which characterizes the degree of safety of completion of process of divergence of vessels, is offered, since the moment of discovery of situation of dangerous rapprochement.

The stages of process of decision-making divergence of vessels of necessity are considered at their rapprochement and choice of strategy of divergence. It is shown that a decision-making process contains the following stages: control of environment, including relative position and parameters of relative motion, exposure of situation of rapprochement of vessels, estimation of degree of danger of rapprochement and choice of strategy of divergence.

Analytical expressions for formalization of the offered stages of process of decision-making divergence of vessels of necessity are resulted.

It is shown that depending on the degree of danger of situation of rapprochement, it is necessary to choose strategy of divergence, coming co-ordination of maneuvers of the drawn together vessels from, foreseen ColReg. Thus character of maneuver of divergence is also determined by the value of situation indignation. As a rule, application of standard maneuver of divergence is foreseen, and in the situation of excessive

rapprochement of vessels, in order to avoid the collision it is necessary to use the maneuver of urgent divergence.

As the index of efficiency of the analytical collision avoidance systems vessels probability of safe completion of process of divergence, which is work of probabilities of successful finish of stages of process of decision-making on the choice of strategy of divergence, is offered.

For the system of the automatic warning of collisions the methods of divergence with one dangerous target are offered by the change of course or speed of ship and with two dangerous targets by the combined maneuver of the repeated change of course of ship.

After the preliminary analysis the perspective most effective methods of the mentioned types of maneuvers of divergence were offered.

For the operative choice of parameters of maneuver of divergence of ship with a target the regions of impermissible values of parameters of deviation and region of acceptability parameters of deviation and output are offered.

For the case of choice of maneuver of divergence of ship by the decline of speed the active or passive braking offers the method of forming of region of impermissible speeds and calculation of its scopes.

In the situation of dangerous rapprochement of ship with two targets for the operative choice of parameters of maneuver of divergence of ship in work it is suggested to form the region of acceptability successive courses of deviation.

Keywords: *safety of navigation, process of divergence of vessels, locally-independent management, region of impermissible parameters.*

© Хуссейн Ю. М., Янчецький О. В.

Статтю прийнято
до редакції 16.06.20