

УДК 656.61.052.484

## HYBRID CONTROL SYSTEM BY COOPERATION OF VESSELS IN SITUATION OF THEIR DANGEROUS RAPPROCHEMENT

## ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ СУДОВ В СИТУАЦИИ ИХ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ

**M.A. Kulakov**, *PhD student*, **A.Yu. Kozachenko**, *assistant*, **V.V. Stepanenko**, *PhD, associate professor*

**М. А. Кулаков**, *аспирант*, **А.Ю. Козаченко**, *ассистент*, **В.В. Степаненко**, *к.т.н., доцент*

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

### ABSTRACT

In work for warning of collisions of two и three ships the structure of the two-tier hybrid system of coordination which is built on the existent system of the binary coordination COLREGis offered in the situations of their dangerous rapprochement.

In case of occurring of situation of dangerous rapprochement of two ships the first level is used, and the second level is used at dangerous rapprochement of three ships.

In quality the first level in the hybrid system of coordination existing recommends COLREG. If there is the situation of dangerous rapprochement of two ships cooperation which is determined by a binary coordinator and as a result of which ships execute the general maneuver of divergence takes place. At first level a coordinator analyses relative position of ships which are dangerously drawn together, takes into account their statuses and addresses them coordinating signals. These signals specify mutual duties to each of ships, in obedience to which ships choose strategy of divergence, when it is required that first from ships kept the parameters of motion, and the second ship conducted the maneuver of divergence, or both ships coordinated execute the maneuvers of divergence.

In the situation of dangerous rapprochement of three ships it is suggested to form the second level of the hybrid system of coordination as follows. At presence of three ships which are dangerously drawn together, additionally there are situation indignations which in general case can take on a value from 0 to 2. The second level of the hybrid system of coordination, which for such situation of rapprochement forms the additional signals of coordination also, is therefore used. A coordinator addresses to the base ship the signals of coordination, which determine his conduct in relation to the second and third ships, that his type of maneuver of divergence is determined.

If the signals of coordination in relation to both ships coincide and require yielding, a base ship must concede a way to the ships, with which cooperates, by the

maneuver of divergence general for both ships or two successive maneuvers for each of them. In time, when the signals of coordination require from a base ship to keep unchanging a course and speed after the relation of both ships, a base ship executes this requirement on condition that both targets execute the foreseen maneuvers of deviation.

A numeral example is resulted in completion of the article.

**Keywords:** safety of navigation, cooperation of vessels, binary coordination, hybrid system of coordination.

## РЕФЕРАТ

В роботі для попередження зіткнень двох и трьох суден в ситуаціях їх небезпечного зближення запропоновано структуру дворівневої гібридної системи координації, яка побудована на існуючій системі бінарної координації МППЗС-72.

При виникненні ситуації небезпечного зближення двох суден використовується перший рівень, а другий рівень застосовується при небезпечному зближенні трьох суден.

В якості першого рівня в такій гібридній системі координації рекомендовано існуючі МППЗС-72. Якщо виникає ситуація небезпечного зближення двох суден має місце взаємодія, котра визначається бінарним координатором і в результаті якої судна виконують спільний маневр розходження. На першому рівні координатор аналізує відносну позицію суден, що небезпечно зближуються, враховує їх статуси і адресує їм координуючі сигнали. Дані сигнали вказують кожному із суден взаємні обов'язки, згідно яким судна вибирають стратегію розходження, коли вимагається, щоб одно із суден зберігало свої параметри руху, а друге судно проводило маневр розходження, або обидва судна скоординовано виконують маневри розходження.

В ситуації небезпечного зближення трьох суден другий рівень гібридної системи координації запропоновано сформуванню наступним чином. При наявності трьох суден, що небезпечно зближуються, додатково виникають ситуативні збурення, які в загальному випадку можуть приймати значення від 0 до 2. Тому використовується другий рівень гібридної системи координації, який для такої ситуації зближення формує також додаткові сигнали координації. Координатор адресує базовому судну сигнали координації, які визначають його поведінку по відношенню до другого та третього суден, тобто визначають його тип маневру розходження.

Якщо сигнали координації відносно обох суден співпадають та вимагають поступитися, то базове судно повинно поступитися дорогою суднам, з якими взаємодіє, маневром розходження спільним для обох суден або двома послідовними маневрами для кожного із них. В разі, коли сигнали координації вимагають від базового судна зберігати незмінними курс та швидкість по відношенню обох суден, базове судно виконує дану вимогу при умові, що обидві цілі виконують передбачені маневри ухилення.

В завершения статті приведено чисельний приклад.

**Ключові слова:** безпечність судноводіння, взаємодія суден, бінарна координація, гібридна система координації.

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

Морские суда значительную часть эксплуатационного времени работают в стесненных условиях, где маневрирование судна затруднено, и плавание производится по единственно безопасным, нередко весьма стесненным путям. Морское судно проводит в стесненных водах в среднем 5-10 % ходового времени, однако на эти районы приходится свыше 80 % всех навигационных аварий. Предупреждение столкновений судов в стесненных водах является одной из наиболее актуальных проблем в обеспечении безопасности судовождения. Для успешного ее решения необходимо разработать корректную и адекватную математическую модель взаимодействия судов в случае возникновения ситуации опасного сближения двух и трех судов, чем и определяется актуальность темы публикации.

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

Для снижения отрицательного влияния человеческого фактора на безопасность судовождения, особенно в стесненных водах при опасных сближениях судов, в последние десятилетия на основе исследований по автоматизации маневра уклонения судна от столкновения, электронных карт и информационных систем предложен новый тип автоматизированной системы VICAN (Vessel Intelligent Collision Avoidance Navigator) [1]. С этой же целью разработана модель автоматизированной системы предупреждения столкновений судов, которая может использоваться для построения базы знаний [2]. При разработке таких интеллектуальных системы возникает необходимость в формализации взаимодействия судов и их координации для безопасного расхождения, чем и обусловлен выбор темы данной работы.

В работе [3] рассмотрена задача расхождения судов на этапе классификации начальных ситуаций в зависимости от их начальной относительной позиции и параметров движения. Вопросы формализации взаимодействия пары судов в различных ситуациях опасного сближения рассмотрены в работе [4], а в работе [5] освещено взаимодействие судов в ситуации чрезмерного сближения.

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

Целью публикации является формализация взаимодействия при опасном сближении двух и трех судов для координации их маневров расхождения.

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

При плавании в стесненных водах возникают ситуации опасного сближения как двух, так и трех судов, однако существующая система бинарной координации, которая реализована в МППСС-72, предусматривает координацию только парных взаимодействий судов. Поэтому для предупреждения столкновений судов следует разработать систему координации, которая содержит два уровня, причем при возникновении ситуации опасного сближения двух судов используется первый уровень, второй уровень задействуется при опасном сближении трех судов.

В качестве первого уровня в такой гибридной системе координации целесообразно выбрать существующие МППСС-72. В случае опасного сближения двух судов возникают ситуационные возмущения  $\omega_{12}$  и  $\omega_{21}$  [3] и взаимодействие, которое предписывается бинарным координатором  $C_2$  (МППСС-72 в части маневрирования судов при расхождении, являющиеся первым уровнем гибридной системы координации), в результате которого суда выполняют согласованный маневр расхождения. На первом уровне координатор  $C_2$  анализирует относительную позицию судов, которые опасно сближаются, учитывает их статусы, и предписывает им координирующие сигналы  $\gamma_{12}$  и  $\gamma_{21}$  [3]. Указанные сигналы предписывают каждому из взаимодействующих судов взаимные обязанности, согласно которым суда выбирают стратегию расхождения, когда одно из судов сохраняет свои параметры движения, а второе судно производит маневр расхождения, или оба судна согласованно выполняют маневры расхождения.

В ситуации опасного сближения трех судов второй уровень гибридной системы координации предлагается сформировать следующим образом. При наличии трех опасно сближающихся судов дополнительно возникают ситуационные возмущения  $\omega_{13} = \omega_{31}$  и  $\omega_{23} = \omega_{32}$ , которые в общем случае могут принимать значения от 0 до 2. Поэтому задействуется второй уровень гибридной системы координации, при использовании которого обобщенный координатор  $C_2$  в рассматриваемой ситуации сближения помимо сигналов  $\gamma_{12}$  и  $\gamma_{21}$  формирует также координирующие сигналы  $\gamma_{13}$ ,  $\gamma_{31}$ ,  $\gamma_{23}$  и  $\gamma_{32}$ . Координатор  $C_2$  адресует оперирующему судну сигналы координации  $\gamma_{12}$  и  $\gamma_{13}$ , определяющие его поведение по отношению ко второму и третьему судну, которые предписывают ему тип маневра расхождения. Если сигналы координации согласованные (с одинаковым значением) и имеют значения  $\gamma_{12} = 1$ ,  $\gamma_{13} = 1$ , то оперирующее судно уклоняется, уступая обоим судам дорогу. В случае согласованных сигналов координации со значениями  $\gamma_{12} = 0$ ,  $\gamma_{13} = 0$  оперирующее судно сохраняет неизменные параметры движения. Возможны ситуации опасного сближения, в которых сигналы координации могут противоречить друг другу ( $\gamma_{12} = 1$ ,  $\gamma_{13} = 0$  или  $\gamma_{12} = 0$ ,  $\gamma_{13} = 1$ ), т. е.

оперирующее судно одновременно одному из судов должно уступать дорогу, а относительно второго судна сохранять неизменными курс и скорость.

Если координирующие сигналы согласованны, причем  $\gamma_{12} = 1$  и  $\gamma_{13} = 1$ , то оперирующее судно должно уступить дорогу судам, с которыми взаимодействует, маневром расхождения, реализующимся либо общим маневром для обоих судов, или двумя последовательными маневрами для каждого из них. В случае, когда координирующие сигналы  $\gamma_{12} = 0$  и  $\gamma_{13} = 0$  предписывают оперирующему судну сохранять неизменными курс и скорость относительно обоих судов, оперирующее судно выполняет данное требование при условии, что обе цели выполняют предписанные маневры уклонения. Если же хотя бы одна из целей не уступает дорогу оперирующему судну, выполняя предписанный маневр расхождения, то последнее сохраняет постоянными курс и скорость до некоторого момента времени, после которого оно вынуждено собственным маневром предупредить возможное столкновение.

В случае противоречивых координирующих сигналов оперирующее судно решает возникшее противоречие тем, что предпринимает маневр расхождения, который является безопасным для обеих судов в нулевой момент времени.

Рассмотрим использование второго уровня гибридной системы координации при возникновении ситуации опасного сближения трех судов с переменными параметрами движения оперирующего судна  $K_1 = 245^\circ$ ,  $V_1 = 19$  узлов, первой цели -  $K_2 = 50^\circ$ ,  $V_2 = 18$  узлов, второй цели -  $K_3 = 330^\circ$ ,  $V_3 = 25$  узлов; относительной позицией  $\alpha_{12} = 235^\circ$ ,  $d_{12} = 4,8$  мили,  $\alpha_{13} = 175^\circ$ ,  $d_{13} = 4,75$  мили,  $\alpha_{23} = 112^\circ$ ,  $d_{23} = 5,0$  миль. По исходным данным были рассчитаны дистанции кратчайшего сближения судов:  $D_{\min 12} = 0,1$  мили,  $D_{\min 13} = 0,1$  мили,  $D_{\min 23} = 0,9$  мили. Все три сближающиеся судна являются судами с механическим двигателем, поэтому имеют одинаковый статус. С учетом их относительного положения координатором формируются следующие координирующие сигналы:  $\gamma_{12} = 0$ ,  $\gamma_{21} = 1$ ,  $\gamma_{13} = 0$ ,  $\gamma_{31} = 1$ ,  $\gamma_{23} = 1$  и  $\gamma_{32} = 0$ .

В данном примере координирующие сигналы  $\gamma_{12} = 0$  и  $\gamma_{13} = 0$  являются согласованными, поэтому если обе цели выполняют предписанные координатором маневры уклонения, то оперирующее судно сохраняет неизменные параметры движения. Если же хотя бы одна из целей не уступает дорогу оперирующему судну, то последнее следует постоянным курсом и скоростью до некоторого момента времени  $\tilde{t}$ , после которого собственным маневром расхождения предупреждает возможное столкновение. В данном примере момент времени  $\tilde{t}$  определяется уменьшением дистанций  $d_{12}$  до значений  $d_{12} = 3,4$  мили. В этот момент времени оперирующее судно уклоняется на курс  $K_{1y} = 285^\circ$ , в результате чего оперирующее судно

безопасно расходится с целями на расстояниях  $D_{\min 12} = 1,7$  мили и  $D_{\min 13} = 1,0$  мили.

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

Таким образом, в статье предложена двухуровневая гибридная система координации, использующая бинарную координацию МППСС-72, для предупреждения столкновений двух и трех судов в ситуации их опасного сближения. В дальнейшем целесообразно произвести анализ эффективности предлагаемой гибридной системы координации.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. 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.
2. Lisowski J. Safety of navigation based – mathematical models of game ship control/ Lisowski J. // Journal of Shanghai Maritime University. - 2004. - No 104, Vol. 25. – P. 65 - 74.
3. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
4. 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.
5. Бурмака, И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А.И., Бужбецкий Р.Ю. - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), 2014. - 202 с.