

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Русинов Игорь Александрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
RusinovIA@gumrf.ru
Гаврилова Ирина Александровна —
кандидат экономических наук.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
Gavrilova.irina.a@gmail.com
Нелогов Андрей Георгиевич — аспирант.
Научный руководитель:
Русинов Игорь Александрович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
andrey.nelogov@united-transport.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Rusinov Igor Alexandrovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
RusinovIA@gumrf.ru
Gavrilova Irina Alexandrovna — PhD.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
gavrilova.irina.a@gmail.com
Nelogov Angrey Georgievich — postgraduate.
Supervisor:
Rusinov Igor Alexandrovich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
andrey.nelogov@united-transport.ru

Статья поступила в редакцию 24 марта 2016 г.

УДК 656.61.052

**И. А. Бурмака,
Г. Е. Калининченко,
М. А. Кулаков**

УПРАВЛЕНИЕ ПАРОЙ СУДОВ В СИТУАЦИИ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ

Рассмотрено два типа управления парой судов в условиях опасного сближения с целью предупреждения их возможного столкновения. Первый подход к предупреждению столкновения судов представляет собой общепринятое в судовождении локально-независимое управление, при котором необходима координация маневров взаимодействующих опасно сближающихся судов. Поэтому в статье изложен принцип бинарной координации взаимодействия пары судов при опасном сближении в случае их локально-независимого управления. Указываются методы выбора оптимальной стратегии расхождения при этом типе управления. Приводится характеристика второго подхода к управлению парой судов в ситуации опасного сближения, который осуществляется с помощью принципа полного управления системой двух опасно сближающихся судов внешним управленцем. Для этого типа управления рассматривается возможность определения безопасного маневра расхождения изменением курса с помощью использования области опасных курсов. Также рассмотрена возможность безопасного расхождения судов изменением скорости при неизменных курсах, при этом предлагается использование области опасных скоростей при заданных начальных курсах. Рассмотрены достоинства внешнего управления судами и возможные перспективы его использования.

Ключевые слова: предупреждение столкновения судов, типы управления судами при опасном сближении, система бинарной координации, области опасных курсов и опасных скоростей пары судов.



ЦЕЛЮ статьи является рассмотрение двух типов управления системой S_{12} пары опасно сближающихся судов для предупреждения столкновения.

Проблема обеспечения безопасного расхождения судов в случае возникновения угрозы их столкновения является одной из наиболее актуальных. В этой ситуации судам надлежит компенсировать ситуационное возмущение путем выполнения маневра расхождения. При этом, как правило, маневр расхождения регламентируется МППСС-72. В стесненных районах плавания

с особенно интенсивным движением для контроля процесса судовождения и управления движением опасно сближающихся судов оборудуются станции управления движением судов (СУДС). Поэтому исследование вопросов управления судами, которые следуют опасными курсами сближения, является актуальным и перспективным направлением.

В работе [1] приведены результаты исследования эффективности парных маневров расхождения, а в работе [2] рассмотрены вопросы предупреждения столкновений судов с помощью гибких стратегий расхождения. Принцип внешнего управления тремя судами для компенсации ситуационного возмущения рассмотрен в работе [3]. Вопросам взаимодействия судов при возникновении угрозы столкновения посвящена работа [4], в которой предложена формализация МППСС-72. Различные модели формализации взаимодействия судов при расхождении и процедуры расчета безопасного маневра освещены в работах [5] – [8]. В работе [5] для описания процесса расхождения используются методы теории оптимальных дискретных процессов, применение метода нелинейной интегральной инвариантности предлагается в работе [6], в работе [7] формализация взаимодействия судов при расхождении производится в рамках теории дифференциальных игр. Ряд особенностей задачи расхождения судов в море освещен в монографии [8], в которой приведен метод предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути.

После возникновения ситуационного возмущения ω необходимо произвести его компенсацию, применяя стратегию расхождения G , которая обеспечивает увеличение дистанции кратчайшего сближения между судами системы S_{12} до величины $D_{\min,y}$, превосходящей предельно-допустимую дистанцию D_d , т. е. $D_{\min,y} \geq D_d$. При этом стратегия может содержать маневр расхождения как одного, так и обоих судов. Маневр расхождения судна содержит два участка: участок уклонения судна с программной траектории для увеличения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} и участок возвращения на программную траекторию движения.

Принципиально важным аспектом управления системой S_{12} является полнота управления, выраженная двумя различными подходами. Суть первого подхода — локально-независимое управление, суть которого заключается в контроле каждым из судов текущего состояния системы S_{12} и при наличии ситуационного возмущения его компенсация производится маневрами обоих судов, причем выбор маневра расхождения производится независимо каждым из судов. Для обеспечения безопасности расхождения необходима согласованность маневров расхождения судов, т. е. координация маневров, позволяющая увеличивать дистанцию кратчайшего сближения. При этом типе управления каждое из судов контролирует текущее состояние системы S_{12} , и при появлении ситуационного возмущения ω между судами возникает взаимодействие Bz , которое программный участок относительного движения с ситуационным возмущением ($D_{\min} < D_d$) трансформирует в относительную траекторию без ситуационного возмущения ($D_{\min,y} \geq D_d$).

Взаимодействие Bz прогнозирует поведение судов при расхождении и предполагает выработку адресных согласованных стратегий каждому из взаимодействующих судов. Поэтому взаимодействие Bz формально может быть записано следующим образом:

$$G = Bz(\bar{F}),$$

где $\bar{F} = (D, \alpha, V_1, K_1, V_2, K_2)$ — вектор состояния системы S_{12} , который характеризуется, соответственно, дистанцией между судами, пеленгом, а также скоростями и курсами судов, причем $G = (G_1, G_2)$.

Таким образом, взаимодействие судов Bz — оператор или отображение параметров состояния системы S_{12} во множество параметров стратегии расхождения G , причем взаимодействие Bz состоит из двух операторов: Crd — координации маневров и Prm — расчета параметров маневров.

Взаимодействие Bz как механизм согласования достижения общей цели предупреждения опасного сближения, определяющее поведение каждого из судов в процессе расхождения и прогнозирующее изменение ситуации, является крайне важным фактором, который оказывает влияние на безопасность расхождения. Таким образом, процесс расхождения является процессом компенсации ситуационного возмущения, т. е. перевода системы S_{12} в подмножество безопасных

состояний согласно механизму взаимодействия Bz , а алгоритм реализации процесса расхождения — стратегией расхождения G .

Реализация взаимодействия Bz осуществляется с помощью системы бинарной координации или координатора $c_0(Bz)$, на вход которого подается вектор состояния F , а выходом являются адресные сигналы судам β_1 и β_2 (рис. 1). В свою очередь, каждый из сигналов β_i содержит координирующий сигнал γ_i и сигнал связи μ_i . Координирующие сигналы γ_i предписывают подмножество курсов уклонения каждого судна, обеспечивающих согласованность маневров расхождения, а сигналы связи μ_i содержат информацию каждому судну о прогнозируемом поведении другого судна системы S_{12} , причем $\mu_1 = \gamma_2$ и $\mu_2 = \gamma_1$.

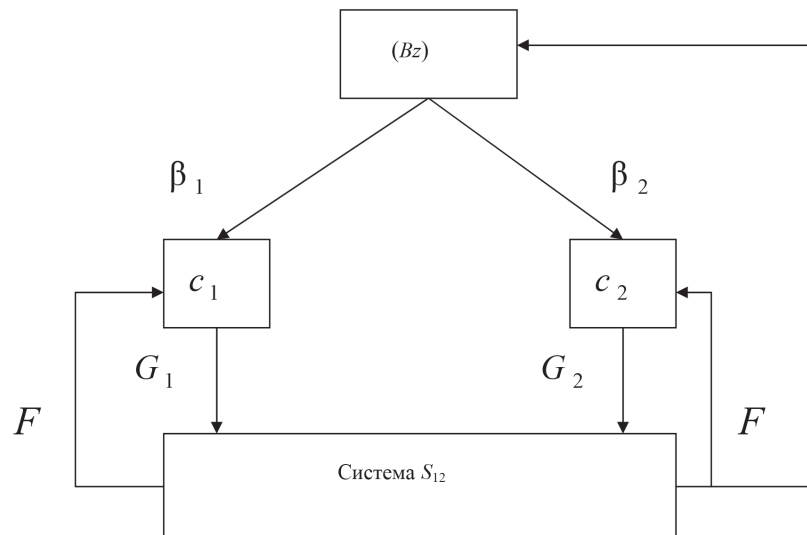


Рис. 1. Принцип локально-независимого управления системой S_{12}

Координирующий сигнал γ_i содержит три составляющие: сигнал q_{1i} о наличии предписываемого координатором приоритета и сигналы q_{2i} и q_{2i}' , которые предписывают взаимодействующим судам возможность уклонения, соответственно, вправо и влево.

С помощью адресного сигнала β_i и вектора состояния \bar{F} каждое из судов c_i системы S_{12} производит выбор маневра расхождения G_i из допустимого подмножества курсов уклонения, которое регламентируется координирующим сигналом γ_i . Следует отметить, что судном c_i производится выбор оптимального маневра, при котором достигается экстремум выбранного критерия оптимальности. Последний выбирается в зависимости от значения реализовавшегося ситуационного возмущения, причем является различным при стандартном маневре расхождения и маневре экстренного расхождения. Выбор оптимального стандартного маневра расхождения пары судов рассмотрен в работах [2], [9]. Компенсация ситуационного возмущения, применяемая в ситуации экстренного расхождения, изложена в работе [10].

Суть второго подхода состоит в полном управлении системой внешним управленцем, который наблюдает состояние системы S_{12} и в случае появления ситуационного возмущения ω формирует общую стратегию расхождения для обоих судов, переводя систему S_{12} в невозмущенное состояние, как показано на рис. 2.

Таким управленцем может быть как СУДС, так и что принципиально важно судовая информационная система с теми же возможностями, установленная на каждом из судов, которая решает задачу коллективной компенсации ситуационного возмущения и реализует полученную индивидуальную стратегию. Внешний управленец Ξ наблюдает вектор состояния \bar{F} системы S_{12} и производит анализ наличия ситуационного возмущения ω , при появлении которого используется оптимальная стратегия (G_1, G_2) . Маневры G_1 и G_2 , как показано на рис. 2, адресованы судам c_1 и c_2 , осуществляющих их реализацию.

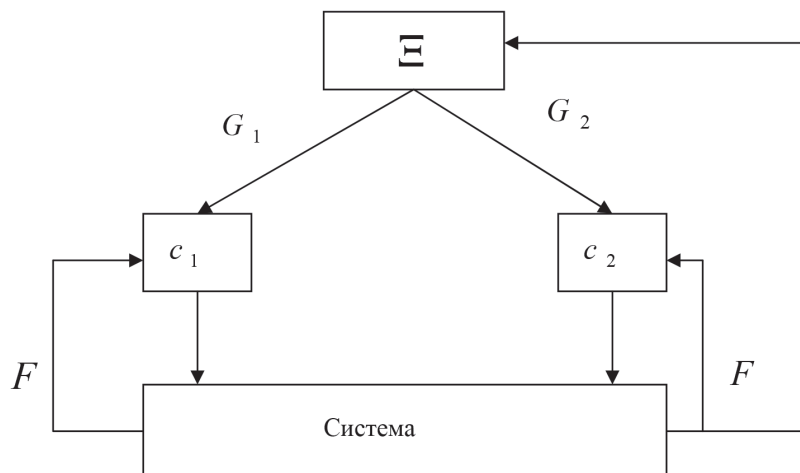


Рис. 2. Принцип полного управления системой S_{12} внешним управленцем

Достоинством полного управления системой S_{12} внешним управленцем является одинаковая интерпретация возмущенного состояния системы S_{12} при выборе маневров расхождения G_1 и G_2 . Компенсация ситуационного возмущения ω производится на первом участке уклонения стратегии G . После завершения участка уклонения реализуется участок выхода на программную траекторию движения. При внешнем управлении, в случае опасного сближения, выбор стратегии расхождения производится не опасно сближающимися судами, а внешним управленцем. Поэтому в такой ситуации отсутствует система координации, регламентирующая взаимодействие опасно сближающихся судов (МППСС-72). Множество состояний системы S_{12} , как показано в работе [11], целесообразно представлять областью опасных курсов, которая отображается на расширенной плоскости курсов судов, как показано на рис. 3.

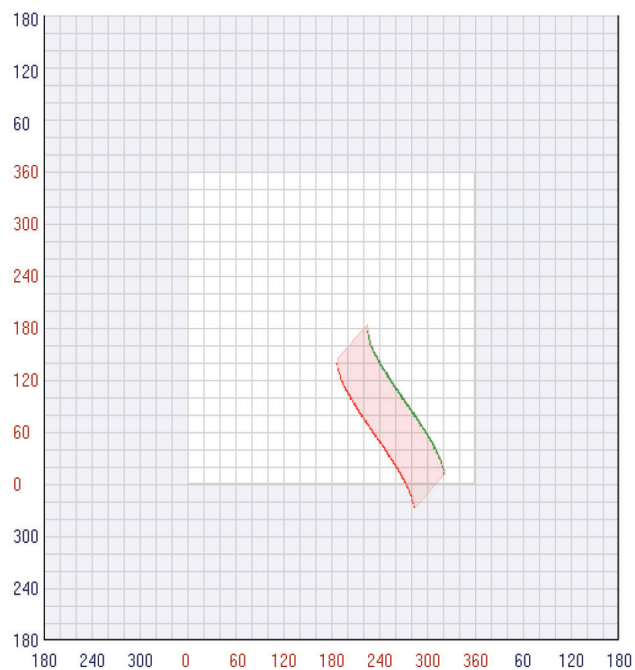


Рис. 3. Опасная область курсов системы S_{12}

Границами области являются точки (K_1, K_2) , которые удовлетворяют уравнению

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

где $\gamma = \alpha \pm \arcsin \frac{D_d}{D}$ (здесь α и D — соответственно пеленг и дистанция между судами, а D_d — предельно-допустимой дистанции сближения).

Если точка (K_1, K_2) находится внутри области опасных курсов, то дистанция кратчайшего сближения D_{\min} меньше предельно-допустимой дистанции D_d и сближение судов является опасным. В случае положения точки (K_1, K_2) на границе или вне области опасных курсов угроза столкновения отсутствует.

Если для пары судов точка с программными курсами (K_{10}, K_{20}) находится в области опасных курсов, то маневром изменения курсов судов при их неизменных скоростях необходимо изменить состояние системы S_{12} , соответствующее точке (K_{1y}, K_{2y}) , которая не принадлежит области опасных курсов. При этом переход из состояния ситуационного возмущения (K_{10}, K_{20}) в безопасное состояние (K_{1y}, K_{2y}) требует затрат, равных минимальным изменениям курсов судов.

В случае, когда опасно сближающиеся судна не могут изменять свой курс, предупреждение столкновения возможно изменением их скоростей. В этом случае множество состояний системы S_{12} целесообразно представить областью опасных скоростей, которая аналогична области опасных курсов за исключением того, что каждой точке (V_1, V_2) парных скоростей судов соответствует дистанция кратчайшего сближения, характеризующая состояние системы S_{12} . Граница опасной области скоростей, каждая точка которой соответствует дистанции кратчайшего сближения равной предельно-допустимой дистанции, 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, что при постоянных значениях курсов K_1, K_2 и параметров γ^*, γ_* границы опасной области скоростей являются линейными. При плавании судов в стесненных водах надлежит учитывать имеющиеся в районе расхождения судов навигационные опасности. В работе [12] приведена классификация навигационных опасностей в зависимости от характера описывающих их границ, причем предлагается три типа навигационных опасностей: *точечные, линейные распределенные* и *сложные распределенные*. Учет всех трех типов навигационных опасностей при локально-независимом управлении подробно рассмотрен в работе [2], а учету линейной распределенной опасности при выборе параметров маневра расхождения, в частности, посвящена работа [13].

Выводы

1. Отмечается, что для расхождения судов при опасном сближении, как правило, используется локально-независимое управление. В стесненных районах плавания с помощью СУДС может осуществляться принцип полного внешнего управления.
2. При локально-независимом управлении каждое судно индивидуально оценивает ситуацию сближения и принимает решение о необходимости применения маневра расхождения.
3. Для согласования маневров расхождения в случае локально-независимого управления парой судов используется бинарная система координации, определяющая взаимные обязанности судов с учетом особенностей ситуации опасного сближения.
4. Рассмотрено полное внешнее управление судами, когда в ситуации опасного сближения внешний управленец производит оценку ситуации и предписывает каждому из судов маневры расхождения, которые увеличивают дистанцию кратчайшего сближения до безопасного значения.
5. Для полного внешнего управления предложены методы выбора безопасного маневра расхождения изменением курса с помощью области опасных курсов и маневра изменением скорости при неизменных курсах судов, используя области опасных скоростей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пятаков Э. Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э. Н. Пятаков, С. И. Заичко // Судовождение. — 2008. — № 15. — С. 166–171.
2. Цымбал Н. Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н. Н. Цымбал, И. А. Бурмака, Е. Е. Тюпиков. — Одесса: КП ОГТ, 2007. — 424 с.
3. Бурмака И. А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов / И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств. — 2014. — № 20. — С. 18–23.
4. 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.
5. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. — 1984. — № 12. — С. 22–24.
6. 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.
7. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / В. Е. Кудряшов // Судостроение. — 1978. — № 5. — С. 35–40.
8. Вагущенко Л. Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л. Л. Вагущенко. — Одесса: Фенікс, 2013. — 180 с.
9. Сафин И. В. Выбор оптимального маневра расхождения / И. В. Сафин // Автоматизация судовых технических средств. — 2002. — № 7. — С. 115–120.
10. Бурмака И. А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / И. А. Бурмака, А. И. Бурмака, Р. Ю. Бужбецкий. — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. — 202 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.
12. Петриченко Е. А. Описание навигационных опасностей в задаче расхождения судов / Е. А. Петриченко // Судовождение. — 2002. — № 5. — С. 89–95.
13. Петриченко Е. А. Учет линейной навигационной опасности при расхождении судов / Е. А. Петриченко // Автоматизация судовых технических средств. — 2003. — № 8. — С. 72–76.

MANAGEMENT BY PAIR OF VESSELS IN SITUATION OF DANGEROUS RAPPROCHEMENT

Two types of management by the pair of vessels in the conditions of dangerous rapprochement with the purpose of warning of their possible collision are considered. The first approach to warning of collision of vessels is the locally-independent management generally accepted in the navigator, which co-ordination of maneuvers of the interactive dangerously drawn together vessels is needed at. Therefore principle of binary co-ordination of cooperation of pair of vessels at dangerous rapprochement in the case of their locally-independent management is expounded in the article. The methods of choice of optimum strategy of divergence at this type of management are specified.

It is brought description over of the second approach to the management of pair of vessels in the situation of dangerous rapprochement, which is carried out by principle of complete management by the system of two dangerously drawn together vessels by external manager. For this type of management possibility of determination of safe maneuver of divergence by the change of course by the use of region of dangerous courses is examined. Possibility of safe divergence of courts by the change of speed at unchanging courses is also considered, the use of region of dangerous speeds at the set initial courses is here offered. Dignities of external management by vessels are considered and possible prospects of his use.

Keywords: warning of collision of vessels, types of management by vessels at dangerous rapprochement, system of binary co-ordination, region of dangerous courses and dangerous speeds of pair of ships.

REFERENCES

1. Pyatakov, E. N., and S. I. Zaichko. "Ocenka effektivnosti parnykh strategij raskhodjashchikhsya sudov." *Sudovozhdenie* 15 (2008): 166–171.

2. Tsimbal, N. N., I. A. Burmaka, and E. E. Tyupikov. *Gibkie strategii raskhozhdeniya*. Odessa: KP OGT, 2007.
3. Burmaka, I. A., and A. Y. Bulgakov. "Manevr raskhozhdeniya treh sudyv izminenitn kursov." *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv* 20 (2014): 18–23.
4. Pyatakov, E. N., R. Y. Buzhbeckij, I. A. Burmaka, and A. Y. Bulgakov. *Vzaimodeystvie sudov pri raskhozhdenii dlya preduprezhdeniya stolknoveniya*. Kherson: Grin D. S., 2015.
5. Kulikov, A. M., and V. V. Poddubnyy. "Optimalnoe upravlenie raskhozhdeniem sudov." *Sudostroenie* 12 (1984): 22–24.
6. Pavlov, V. V., and N. I. Senshin. "Nekotorye voprosy algoritmtzatsii vybora manevra v situacii raskhozhdeniya sudov." *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika* 68 (1985): 43–45.
7. Kudryashov, V. E. "Sintez algoritmov bezopasnogo upravleniya sudnom pri raskhozhdenii s neskol'kimi obektami." *Sudostroenie* 5 (1978): 35–40.
8. Vagushchenko, L. L. *Raskhozhdenie s sudami smeshcheniem na parallelnuyu liniyu puti*. Odessa: Feniks, 2013.
9. Safin, I. V. "Vybor optimalnogo manevra rasrhozhdeniya." *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv* 7 (2002): 115–120.
10. Burmaka, I. A., A. I. Burmaka, and R. Y. Buzhbeckij. *Ekstrennaya strategiya rasrhozhdeniya pri chrezmernom sblizhenii sudov*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.
11. Bulgakov, A. Y. "Ispolzovanie opasnoy oblasti kursov dvukh sudov dlya vybora dopustimogo manevra rasrhozhdeniya." *Vodnyy transport* 2(20) (2014): 12–17.
12. Petrichenko, E. A. "Opisanie navigacionnykh opasnostey v zadache rasrhozhdeniya sudov." *Sudovozhdenie* 5 (2002): 89–95.
13. Petrichenko, E. A. "Uchet lineynoy navigacionnoy opasnosti pri rasrhozhdenii sudov." *Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv* 8 (2003): 72–76.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурмака Игорь Алексеевич — кандидат технических наук, доцент.
Национальный университет «Одесская морская академия»
burmaka-mob@ukr.net

Калиниченко Григорий Евгеньевич — аспирант.
Научный руководитель:
Бурмака Игорь Алексеевич.
Национальный университет «Одесская морская академия»
grerory_k@ukr.net

Кулаков Максим Александрович — аспирант.
Научный руководитель:
Бурмака Игорь Алексеевич.
Национальный университет «Одесская морская академия»
xxx.xxx3.3@ukr.net

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burmaka Igor Alekseevich — PhD, associate professor.
National university "Odessa maritime academy"
burmaka-mob@ukr.net

Kalinichenko Grigoriy Evgenevich — postgraduate.
Supervisor:
Burmaka Igor Alekseevich.
National university "Odessa maritime academy"
grerory_k@ukr.net

KulakovMaxim Alexandrovich — postgraduate.
Supervisor:
Burmaka Igor Alekseevich.
National university "Odessa maritime academy"
xxx.xxx3.3@ukr.net

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.