



**Yuriy D. Zhukov**  
**Жуков Юрий Данилович**

УДК 629.5.017.2:004.896  
Ж86

## **BUILDING SYSTEM OF SEAFARING SAFETY ASSURANCE ON THE BASIS OF HOLONIC AGENTS**

**ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МОРЕПЛАВАНИЯ НА ОСНОВЕ ХОЛОНИЧЕСКИХ АГЕНТОВ**

**DOI 10.15589/SMI. 2015.02.01**

**Yuriy D. Zhukov**

Ю. Д. Жуков, д-р. техн. наук, проф.  
yuriy.zhukov@spasska.com  
ORC ID: 0000-0002-7454-8007

**Andrey P. Eremenko**

А. П. Еременко, ст. преподаватель  
andrii.yeremenko@nuos.edu.ua  
ORC ID: 0000-0002-8392-7623



**Andrey P. Eremenko**  
**Еременко Андрей Петрович**

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, г. Николаєв*

**Abstract.** The application of holonic multi-agent systems for support of a small-sized ship captain's decision when choosing the type of storm ship handling has been considered. The aim of the study is to improve the efficiency and reliability of the navigation safety provision systems through application of artificial intelligence methods and use of diverse information in the process of decision support. The structure of decision-making process is suggested; it is based on the information from inertial sensors, a satellite navigation system, a radar system, hull deformation sensors, draft sensors and ship's cargo condition sensors. The structure of holonic agencies of a decision support system is formed. It includes agencies for measurement of the waves and ship dynamics parameters, an agency for identification of the ship motion models and wave pattern, an agency of mathematical models, an agency for development of recommendations for a captain choosing the course and the speed, an agency of knowledge database. The results of the study can be applied in developing ship decision support systems capable of self-instruction in the process of the ship navigation under external effects. Construction of a navigation safety provision system based on the suggested holonic structure of the agents allows enhancing the effectiveness of development of recommendations for a captain and the reliability of the ship operation.

**Keywords:** navigation safety; decision support system; ship model identification; multi-agent system; holonic agents..

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы построения эффективных систем поддержки принятия решений при выборе режима штормования для маломерных судов. Предложено использовать разнородную информацию для идентификации модели судна и внешних воздействий для определения оптимального режима штормования, а также концепцию холонических мультиагентных систем для построения системы поддержки принятия решений. Определен состав агентств системы и выполняемые ими задачи. Разработана структура системы поддержки принятия решений.

**Ключевые слова:** безопасность мореплавания; система поддержки принятия решений; идентификация модели судна; мультиагентная система; холонические агенты.

**Анотація.** Розглянуто питання побудови ефективних систем підтримки прийняття рішень для вибору режиму штормування маломірних суден. Запропоновано використовувати різномірну інформацію для ідентифікації моделі судна і зовнішніх впливів для визначення оптимального режиму штормування, а також концепцію холонічних мультиагентних систем для побудови систем підтримки прийняття рішень. Визначено склад агентств системи і завдання, які вони виконують. Розроблено структуру системи підтримки прийняття рішень.

**Ключові слова:** безпека мореплавства; система підтримки прийняття рішень; ідентифікація моделі судна; мультиагентна система; холонічні агенти.

### **References**

[1] Berdinskikh B. V. *Operativnyy kontrol morekhodnosti sudna s ispolzovaniem bortovoy EVM. Avtoreferat Diss.* [Operational control of the ship navigability using an onboard ECM. Author's abstract]. Nikolaev, 1981, 13 p.

- [2] Vagushchenko L. L., Vagushchenko A. L., Zaichko S. I. *Bortovye avtomatizirovannyye sistemy kontrolya morek-hodnosti* [Onboard automated navigability control systems]. Odessa, Fenix Publ., 2005, 274 p.
- [3] Yeremenko A. P. *Neyrosetevyye algoritmy otsenivaniya pogreshnostey besplatformennykh inertialnykh navigatsionnykh sistem* [Neural network algorithms for assessing errors of strapdown inertial navigation systems]. *Elektrotehnika i elektromekhanika: Materialy Mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv, molodykh vchenykh*. [Electronics and Electrical Engineering: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students, Young Scientists]. Mykolaiv, 2010, pp. 73–74.
- [4] Yeremenko A. P. *Neyrosetevyye algoritmy opredeleniya metatsentricheskoy vysoty morskogo podvizhnogo obekta* [Neural network algorithms for determining the metacentric height of a maritime mobile object]. *Zbirnyk tez dopovidei X Mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii PRYLADOBUDUVANNIA: stan i perspektyvy, (19–20.04.2011)* [Proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference «Instrument Engineering: Current State and Prospects»]. Kyiv, 2011, pp. 23.
- [5] Zherebetskiy A. V. *Kholonicheskie agenty v modeli inzhiniringovykh protsessov* [Holonc agents in the model of engineering processes]. *IV Mizhnarodna konferentsiia «Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi»*. *Zbirnyk prats*. [Proceedings of the 4th International Conference «Innovations in Shipbuilding and Ocean Engineering»]. Mykolaiv, 2013, pp. 21–24.
- [6] Zhukov Yu. D. *Obespechenie shtormovoy bezopasnosti malotonnazhnykh sudov pri proektirovanii i ekspluatatsii* [Providing storm safety of small-sized ships in their designing and operation]. Nikolaev, 1994.
- [7] Pavlygin E. D. *Mnogoagentnoe modelirovanie okruzhayushchey obstanovki morskogo sudna* [Multi-agent modeling of the ship surroundings]. Ulyanovsk, 2011.
- [8] Zhukov Yu. D., Gordeev B. N., Zivenko A. V., Greshnov A. Yu., Zimina O. A., Chegrinets V. N., Prishchepov Ye. O. *Polimetricheskie sistemy: teoriya i praktika* [Polymetric systems: theory and practice]. Nikolaev, Atoll Publ., 2012. 382 p.
- [9] Demin S. I., Zhukov Ye. I., Kubachev N. A. *Upravlenie sudnom* [Ship control]. Moscow, Transport Publ., 1991. 359 p.
- [10] Zhukov Ye. I., Libenzon M. N., Pismenny M. N. *Upravlenie sudnom i ego tekhnicheskaya ekspluatatsiya* [Ship control and its technical operation]. Moscow, Transport Publ., 1983, 655 p.
- [11] Ushakov I. Ye. *Radiolokatsionnye metody i sredstva polucheniya informatsii o sostoyanii morskoy poverkhnosti* [Dokt. Diss. [Radar-locating methods and means of obtaining information on the state of the sea surface. Doct. Diss.]. Saint Petersburg, 2001.
- [12] Khomenko D. B. *Razrabotka sposoba avtomaticheskogo opredeleniya parametrov morskogo volneniya dlya povysheniya bezopasnosti plavaniya sudov* [Cand. Diss. [Development of a method of automatic determination of the seaways parameters for improvement of navigation safety. Cand. Diss.]. Vladivostok, 2015.
- [13] Gangeskar R. An Algorithm for Estimation of Wave Height from Shadowing in X-Band Radar Sea Surface Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, no. 6, pp. 3373–3381.
- [14] Gangeskar R. Ocean Current Estimated from X-Band Radar Sea Surface Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, vol. 40, no. 4, pp. 783–792.
- [15] Gerber C., Siekman J., Vierke G. Holonic Multi-Agent Systems. Research Report RR-99-03, 1999. Available at: URL: [http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2011/3775/pdf/RR\\_99\\_03.pdf](http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2011/3775/pdf/RR_99_03.pdf)
- [16] Luo Y., Liu K., Davis D. N. A Multi-Agent Decision Support System for Stock Trading. *IEEE Network*, 2002, no. 1/2, pp. 20–27.
- [17] OCTOPUS-Onboard. Ship Motions Monitoring and Advisory System. Available at: URL: <http://www.amarcon.com/octopus-onboard.html>
- [18] Zhukov Yu., Gordeev B., Zivenko A., Nakonechny A. Polymetric Sensing in Intelligent Systems. *Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation* (edited by Kondratenko Y. P., Duro R. J.). 2015. pp. 211–234.
- [19] Reischert K., Hessner K., Dannenberg J., Trankmann I., Lund B. X-Band Radar as a Tool to Determine Spectral and Single Waves Properties. *Proc. of Fifth International Symposium WAVES 2005*. Madrid, Spain, 2005. Available at: URL: [http://www.oceanwaves.org/download/PDF/OWS\\_WAVES2005.pdf](http://www.oceanwaves.org/download/PDF/OWS_WAVES2005.pdf)
- [20] WaMoS II. Description and Technical Information. Available at: URL: <http://www.oceanwaves.org/basics.html>

**Problem statement.** Intensive growth of shipping is presently accompanied with an increase of the ship accident rate. Accidents result in the crew and passenger casualties, loss of material assets, which are the cargo and

**Постановка проблемы.** Интенсивный рост судоходства в настоящее время сопровождается повышением аварийности судов. Аварии становятся причиной гибели членов экипажа и пассажиров, потери материальных ценностей — груза и самого судна,

the ship proper, as well as significant environmental pollution. As a rule, the share of the seagoing ship operation under the conditions of wind and seaways is 65...70% of its sea days [2]. As the analysis of accidents shows, a considerable number of them is caused by human factor, that is: a navigator's disregard of the safe ship operation or cargo handling rules, lack of information on the wind and wave action parameters and the consequences of its influence on the risk of the accident occurrence and, eventually, selection of a dangerous storm ship handling type. Fatal accidents include primarily ship capsizing, violation of the cargo condition under the heel at large angles and subsequent capsizing, hull destruction during the storm ship handling, etc.

In the process of the storm ship handling, the navigator's main task is choosing the navigation type [2], i.e. determining the vector  $(q, v)$ , where  $q$  is the course over the waves motion, and  $v$  is the ship speed. At that, it is reasonable to use safety parameters and economic efficiency parameters as the trivial constraint and the objective function respectively. At the same time, the application of the mentioned constraint provides reduction to the normative values of probabilities of occurrence of such accidents as ship capsizing, the main or parametric resonance, broaching, waves flooding, slamming, whipping; as well as reduction of the ship rocking amplitudes, velocities and accelerations, dynamic deformations of the ship hull. In turn, the economic efficiency criterion provides the ship's arrival to the port at the specified time and with minimal fuel consumption, which imposes restrictions on the deviations of the current values of the ship speed and course from the calculated optimal mean values for the transition.

The stated problem should be solved in real time. As practice shows, it does not allow the navigator to make the optimal decision without using decision support systems.

**Latest research and publications analysis.** It should be noted that at this point the tools simplifying the process of the navigator's choosing the storm ship handling type (SSHT) have been developed. These include special storm diagrams for choosing the course and speed [6, 9, 10, 12]. However, it is complicated for the navigator to use them in real time, as it requires the knowledge of a number of physical quantities, which are not determined by the standard ship navigation means. In particular, the use of the universal storm diagram by Remez Yu. V. [9, 12] requires values of the apparent wave period  $\tau'$ , the course seaway angle  $q$ , the wave height of the 3% occurrence  $h_{3\%}$ . These values are usually determined visually, which leads to large inaccuracies.

Accounting of the ship loading with the purpose of limiting the hull dynamic deformations is of particular difficulty. For a number of ships, especially fishing ships, loading and mass distribution in the hull varies significantly in the circumstances of navigation. At that, the use of diagrams which take into account changes in forward

значительного загрязнения окружающей среды. Как правило, доля работы морского судна в условиях ветра и волнения составляет 65...70% его ходового времени [2]. Как показывает анализ аварий, их значительная часть вызвана человеческим фактором, а именно: пренебрежением судоводителем правилами безопасной эксплуатации судна, выполнением грузовых операций, недостатком информации о параметрах ветро-волновых воздействий и последствий их влияния на риск возникновения аварийной ситуации и, в конечном итоге, выбором опасного режима штормования. Фатальными авариями являются опрокидывание судна, нарушение состояния груза при крене на большие углы с последующим опрокидыванием, разрушение корпуса в процессе штормования и т. п.

В процессе штормования основная задача судоводителя — выбор режима плавания [2], т. е. определение вектора  $(q, v)$ , где  $q$  — курс относительно бега волн,  $v$  — скорость хода судна. При этом целесообразно использовать параметры безопасности и экономической эффективности как тривиальное ограничение и целевую функцию соответственно. Выполнение указанного ограничения позволяет уменьшение до нормативных значений вероятностей возникновения таких явлений, как опрокидывание судна, основной или параметрический резонанс, бродяг, заливание волнами, слеминг, вилинг, а также уменьшение амплитуд, скоростей и ускорений качки судна, динамических деформаций корпуса. В свою очередь, критерий экономической эффективности обеспечивает прибытие судна в порт в заданное время и с минимальными затратами топлива, что накладывает ограничения на отклонения текущих значений скорости и курса судна от рассчитанных оптимальных средних значений для перехода.

Решение поставленной задачи необходимо осуществлять в режиме реального времени, что, как показывает практика, делает невозможным принятие оптимального решения судоводителем без использования систем поддержки принятия решений.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Следует отметить, что к настоящему времени созданы средства, упрощающие процесс выбора судоводителем режима штормования (РШ). К ним относятся специальные штормовые диаграммы для выбора курса и скорости [6, 9, 10, 12], однако их применение судоводителем в режиме реального времени затруднительно, поскольку необходимо знание ряда физических величин, не определяемых штатными навигационными средствами судна. В частности, универсальная штормовая диаграмма Ю. В. Реме-за [9, 12] требует для своего использования значения кажущегося периода волны  $\tau'$ , курсового угла волнения  $q$ , высоты волн 3%-й обеспеченности  $h_{3\%}$ . Эти величины, как правило, находятся визуально, что приводит к большим погрешностям.

Особую сложность представляет учет загрузки судна с целью ограничения динамических деформаций корпуса. Для ряда судов, в частности рыбопромысловых, загрузка и распределение масс в корпусе существенно изменяется в условиях плавания. При этом применение диаграмм, учитывающих измене-

and aft drafts [10, 12] is complicated by the need to measure the mentioned parameters, as well as the need to monitor the ship's stability.

The problem of choosing the storm ship handling type can be solved only in the presence of large volumes of information on current and predicted external effects, dynamic characteristics of the ship, when some of the quantities are not exactly known. Thus, the support of the navigator's decision when choosing the storm ship handling type through appropriate information decision support systems (DSS) is urgent. Such systems analyze incoming data and generate recommendations for the navigator on choosing the values of the course and speed.

There are industrial DSS CSSHT developments; notably, the system Octopus DSS produced by the company Amarcos [2, 17] generates recommendations for the navigator in the form of storm diagrams. At that, it is providing automatic data acquisition from the systems measuring the dynamic parameters of the ship, such as DIMMax, Kongsberg MRU, Ixsea Octans, and the WaMoS II radar-locating systems determining the seaway parameters [19, 20].

However, the DSS CSSHT is not common enough on ships, especially those of low tonnage, given the limited set of navigational equipment and its high cost. Therefore, the urgent problem is to develop the highly efficient DSS CSSHT suitable for installation on low-tonnage ships.

**THE ARTICLE AIM** is to develop the ways of improving the efficiency and reliability of the DSS CSSHT by applying artificial intelligence methods.

**Basic material.** The DSS structure should reflect the processes of measurement of the parameters of the ship and external effects, estimation of the accident probabilities, development of conditions of the optimal SSHT and its provision to the navigator.

The generalized structure of the suggested DSS CSSHT meeting the above requirements is shown in Figure 1.

The initial information is the data from the onboard monitoring [6, 8, 18] and navigation systems. They determine propulsion speed, true course, trim and heel, angular rates and linear accelerations of the main types of rocking, etc. To estimate the parameters of the wind and wave effects, it is reasonable to use standard ship tools and the radar-locating seaway parameters meter [1, 11–14]. According to the results of the measurements of external effects, current reaction of the ship and background information on the ship loading, its mathematical model is identified [3, 4].

On the basis of the obtained mathematical model, the probability of critical and emergency situations, each of which is a separate independent phenomenon possible at storm ship handling, is estimated. Such situations are: ship capsizing; occurrence of bottom slamming; occurrence of broaching; exceeding the admissible deformation of the hull; occurrence of parametric rocking res-

ние осадок носом и кормой [10, 12], усложняется необходимостью измерения указанных величин и контроля остойчивости судна.

Поскольку задача выбора режима штормования может быть решена лишь при наличии больших объемов информации о текущих и прогнозных внешних воздействиях, динамических характеристиках судна, причем некоторые величины известны неточно, актуальной становится поддержка принятия решений судоводителем при выборе РШ с помощью соответствующих информационных систем поддержки принятия решений (СППР). Такие системы анализируют поступающие данные и вырабатывают рекомендации судоводителю по выбору значений курса и скорости.

Существуют промышленные разработки СППР ВРШ, в частности система Octopus DSS фирмы Amarcos [2, 17] предлагает рекомендации судоводителю в виде штормовых диаграмм, при этом обеспечивается автоматическое получение данных от систем измерения динамических параметров судна, таких как DIMMax, Kongsberg MRU, Ixsea Octans, и радиолокационных систем определения параметров волнения WaMoS II [19, 20].

Тем не менее, СППР ВРШ недостаточно распространены на судах, особенно малотоннажных, учитывая ограниченный состав навигационного оборудования и его высокую стоимость. Поэтому актуальным является создание высокоэффективных СППР ВРШ, пригодных для установки на малотоннажные суда.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** — разработка способов повышения эффективности и надежности СППР ВРШ путем применения методов искусственного интеллекта.

**Изложение основного материала.** Структура СППР должна отражать процессы измерения параметров судна и внешних воздействий, оценки вероятностей развития аварийных ситуаций, выработки условий оптимального РШ и предоставления их судоводителю.

Обобщенная структура предлагаемой СППР ВРШ, отвечающей указанным выше требованиям, представлена на рис. 1.

Исходной информацией являются данные бортовых мониторинговых [6, 8, 18] и навигационной систем, определяющих скорость хода, истинный курс, крен и дифферент, угловые скорости и линейные ускорения основных видов качки и т. д. Для оценки параметров ветро-волновых воздействий целесообразно использование штатных средств судна и радиолокационного измерителя параметров волнения [1, 11–14]. По результатам измерений внешних воздействий, текущей реакции судна и исходной информации по загрузке судна производится идентификация его математической модели [3, 4].

На основании полученной математической модели автоматически выполняется оценка вероятности возникновения критических и аварийных ситуаций, каждая из которых представляет собой отдельное самостоятельное явление, возможное при штормовании судна, в частности опрокидывание судна, возникновение днищевого слеминга, брочинга, превы-

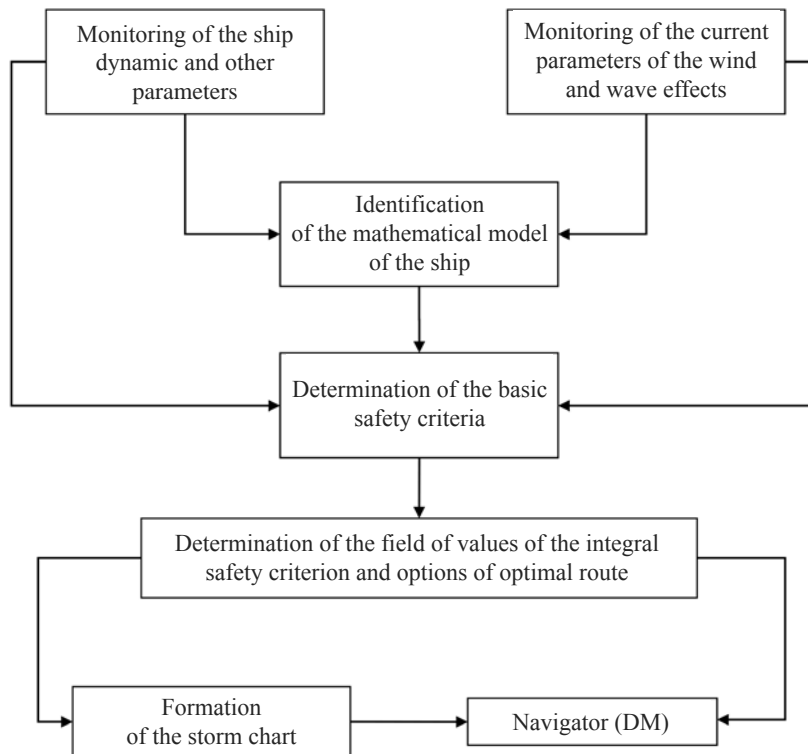


Fig. 1. Structure of the decision support process

Рис.1. Структура процесса поддержки принятия решений

*Monitoring of the ship dynamic and other parameters* — мониторинг динамических и других параметров судна; *monitoring of the current parameters of the wind and wave effects* — мониторинг текущих параметров ветро-волновых воздействий; *identification of the mathematical model of the ship* — идентификация математической модели судна; *determination of the basic safety criteria* — определение элементарных критериев безопасности; *determination of the field of values of the integral safety criterion and options of optimal route* — определение поля значений интегрального критерия безопасности и вариантов оптимальных маршрутов; *formation of the storm chart* — формирование штормовой диаграммы; *navigator (DM)* — судоводитель (ЛПП)

onance; deviation from the route and disruption of the transition plan.

For each of the described critical situations there may be different recommended SSHT in the form of allowable values of vessel speed  $v$  and course angle  $q$ , and also additional values, such as the rational values of trim and others.

In the process of developing an optimal SSHT, it is necessary to unite all the received criteria into an integral optimality criterion which takes into account both the safety provision and economic efficiency of SSHT. This problem is a problem of multi-criterion optimization and can be constructed on the basis of criteria convolution [11].

On the basis of the integrated optimality criterion, the diagram of safe storm ship handling (DSSSHT), which shows the degree of danger for the possible combinations of the values of the ship speed  $v$  and course angle  $q$ , is constructed. The navigator receives the DSSSHT, as well as the recommendations on the selection of the optimal SSHT.

The selection of software system architecture is important when developing the DSS SSHT. It is reasonable to use the concept of multi-agent system (MAS) in the

шение допустимых значений деформаций корпуса судна, возникновение параметрического резонанса качки, отклонение от заданного маршрута и нарушение плана перехода.

Для каждой из описанных критических ситуаций могут существовать различные рекомендуемые РШ в виде допустимых значений скорости судна  $v$  и курсового угла  $q$ , а также дополнительные величины, такие как рациональные значения посадки судна и др.

В процессе выработки оптимального РШ необходимо объединить все полученные критерии в интегральный критерий оптимальности, который учитывает как обеспечение безопасности, так и экономическую эффективность РШ. Данная задача оптимизации будет многокритериальной оптимизацией и может быть построена на основе свертки критериев [11].

С помощью интегрального критерия оптимальности формируется диаграмма безопасного штормования (ДБШ), которая отображает степень опасности для возможных сочетаний значений скорости судна  $v$  и курсового угла  $q$ . Судоводителю выдается ДБШ, а также рекомендации по выбору оптимального РШ.

При разработке СППР ВРШ важным вопросом является выбор программной архитектуры системы. Целесообразным становится применение концепции мультиагентной системы (МАС) при проектировании

design of DSS SSHT. Such systems consist of hardware and software entities, i.e. intelligent agents that encapsulate a specific operation or stage in the process of decision support [7, 16].

Each agent has the following properties: independence from the existence of other agents, ability to interact with other agents, ability to respond to the state of its environment, ability to act in order to achieve a certain goal. In general, the concept of intelligent agent is based on the BDI architecture — knowledge, desires, intentions [5, 15].

The interaction of the agent with the environment and other agents can be represented by the following structure (fig. 2).

The interaction between the agents is performed by sending messages through a common communication medium. The message contains both proprietary information (identifiers-tags of a sender, recipient and message itself), as well as the basic data generated by the sending agent.

The agents that perform similar tasks are united into agencies, and the data exchange among members of the agency is more intense than with other agents.

The process of constructing the integrated optimality criterion in the DSS CSSHT is about combining the basic criteria, and the definition domains of the criteria (SSHT parameters) coincide. Taking this into account, it is suggested to use the principle of holonic MAS (HMAS) for constructing the DSS CSSHT based on the MAS. The essence of a holon as a special agent of the MAS is that it is a union of several (or all) of the MAS agents. At this, its structure mirrors the MAC agents structure and the information area (the environment) is an association of information areas of individual agents. [15] Thus, a ho-

СППР ВРШ. Такие системы состоят из программно-аппаратных сущностей — интеллектуальных агентов, инкапсулирующих определенную операцию или этап процесса поддержки принятия решений [7, 16].

Каждый агент имеет следующие способности быть независимым от существования других агентов, взаимодействовать с другими агентами, реагировать на состояние окружающей его среды, действовать для достижения некоторой цели. В целом, концепция интеллектуального агента основывается на архитектуре BDI — знания, желания, намерения [5, 15].

Взаимодействие агента с окружающей средой и другими агентами может быть представлено в виде следующей структуры (рис. 2).

Взаимодействие между агентами производится путем передачи сообщений через общую коммуникационную среду. Сообщение содержит как служебную информацию (идентификаторы-теги отправителя, получателя, самого сообщения), так и основные данные, формируемые агентом-отправителем.

Агенты, выполняющие сходные задачи, объединяются в агентства, причем обмен данными между членами агентства более интенсивный, чем с другими агентами.

Процесс построения интегрального критерия оптимальности в СППР ВРШ состоит в интеграции элементарных критериев, при этом области определения критериев (параметры РШ) совпадают. Учитывая это, предлагается использовать для построения СППР ВРШ на основе МАС принцип холонических МАС (ХМАС). Сущность холона как особого агента МАС состоит в том, что он представляет собой интеграцию нескольких (или всех) агентов МАС и при этом его структура повторяет структуру агентов МАС, а информационная область (окружение) является объединением информационных областей отдельных агентов [15]. Таким образом, группа холонических агентов функционирует как единый агент

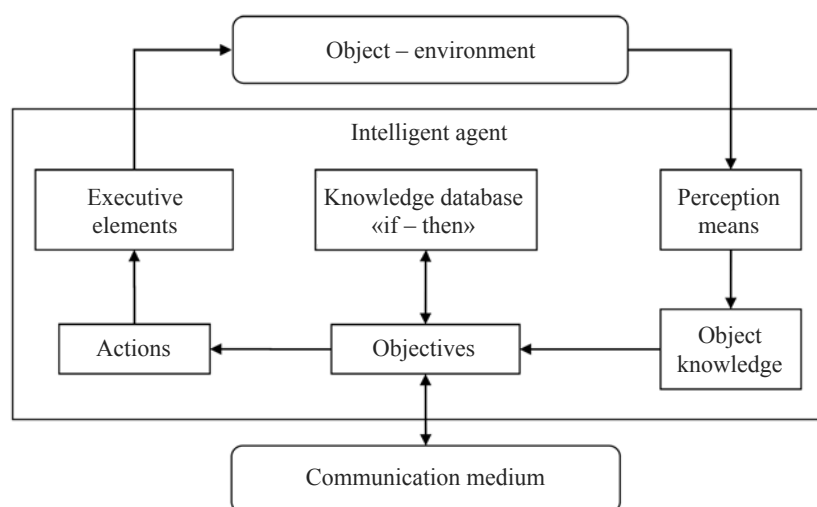


Fig. 2. Interaction of the MAS agent with the environment and other agents

Рис. 2. Взаимодействие агента МАС с окружающей средой и другими агентами

*Object-environment* — объект-окружающая среда; *intelligent agent* — интеллектуальный агент; *executive elements* — исполнительные элементы; *knowledge database «if-then»* — база знаний «если-то»; *perception means* — средства восприятия; *object knowledge* — знания об объекте; *objectives* — цели деятельности; *actions* — действия; *communication medium* — коммуникационная среда

lonic agents group functions as a single agent (Figure 3). Indications in Figure 3:  $A_i$  — agents,  $E_i$  — information environment of the  $i$ -th agent. The agents can unite in a holon both within a single agency and throughout the HMAS. The formalization of the holon building process is based on the properties of the operator of merging the subject domains of individual agents.

As applied to the DSS CSSHT, the use of the HMAS can be based on uniting either the agents working with the same data, but implementing various processing methods and algorithms or the agents working with different data on the ship parameters and external effects.

Considering the stages of the decision support process, it is reasonable to use the following agencies for constructing the DSS CSSHT:

- agency for measuring the parameters of the ship motion and the environment;
- model identification agency;
- mathematical models agency;
- knowledge database agency;
- agency for constructing the DSSSHT and developing the recommendations for the navigator.

The structure of the DSS CSSHT based on the MAC is shown in Figure 4. The agency for measuring the parameters of the ship motion and the environment (AMPS) consists of the agents directly interacting with the ship measuring systems. They are the inertial sensors which measure the ship angular orientation, linear and angular speed and rocking acceleration; the satellite navigation system used for correcting the inertial sensors and generating information about the ship location and its linear speed; the radar system used for measuring the parameters of seaway; the hull strain gauges for the control of hull strength when exposed to dynamic forces caused by rocking; the trim sensors for determining the ship orientation. The information obtained by the AMPS has redundancy, so the AMPS also implements the algorithms for optimal estimation and filtration of signals. The output of the AMPS are the parameters of the ship motion and a wave pattern determined by the agents due to the radar images of the rough sea surface.

The model identification agency (MIA) provides the identification of mathematical models of the ship, seaway and rocking. The MIA agents implement the neural network identification algorithms. The mathematical models themselves are implemented in the form of the mathematical models agency (MMA). At this, the parameters and the general form of the models are the product of the

(рис. 3), где обозначено  $A_i$  — агенты,  $E_i$  — информационное окружение  $i$ -го агента. Интеграция агентов в холоны может происходить как в пределах одного агентства, так и во всей ХМАС. Формализация процессов построения холона основана на свойствах оператора слияния предметных областей отдельных агентов.

Касательно СППР ВРШ применение ХМАС может базироваться на объединении агентов, работающих с одними и теми же данными, но реализующими различные методы их обработки и алгоритмы, либо на объединении агентов, работающих с различными данными о параметрах судна и внешних воздействий.

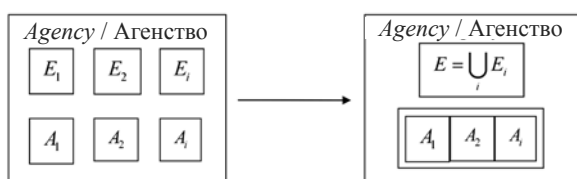
Учитывая этапы процесса поддержки принятия решений, целесообразно использовать для построения СППР ВРШ следующие агентства:

- измерений параметров движения судна и окружающей обстановки;
- идентификации моделей;
- математических моделей;
- базы знаний;
- формирования ДБШ и указаний судоводителю.

Структура СППР ВРШ на основе МАС показана на рис. 4. Агентство измерений параметров движения судна и окружающей обстановки (АИПС) объединяет агентов, непосредственно взаимодействующих с судовыми измерительными системами, такими как инерциальные датчики, измеряющие угловую ориентацию судна линейные и угловые скорости и ускорения качки; спутниковая навигационная система, используемая для коррекции инерциальных датчиков и выработки информации о местоположении судна и его линейной скорости; радиолокационная система, применяемая для измерения параметров морского волнения; датчики деформаций корпуса для контроля прочности при воздействии динамических усилий, вызванных качкой; датчики посадки для определения ориентации судна. Информация, получаемая АИПС, имеет избыточность, поэтому АИПС также реализует алгоритмы оптимального оценивания и фильтрации сигналов. Выходными данными АИПС является спектр волнения, определяемый агентами по радиолокационным изображениям взволнованной поверхности моря, и параметры движения судна.

Агентство идентификации моделей (АИМ) осуществляет идентификацию математических моделей судна, волнения, и качки. Агенты АИМ выполняют операции нейросетевой идентификации. Собственно математические модели представлены в виде агентства математических моделей (АММ), при этом параметры и общая форма моделей есть продуктом восприятия агентов АИМ, фактически АММ является «цифровым близнецом» реальности, окружающей СППР ВРШ. Математическая модель судна (агент 3) учитывает геометрические, гидродинамические и инерционные характеристики корпуса.

Основным агентством СППР ВРШ является агентство формирования ДБШ и рекомендаций судоводителю (АРС). Его агенты оценивают вероятность развития аварийных ситуаций, таких как бродяг, параметрический резонанс качки судна,



**Fig. 3.** Process of the holonic unification of the MAS agents  
**Рис. 3.** Процесс холонического объединения агентов МАС

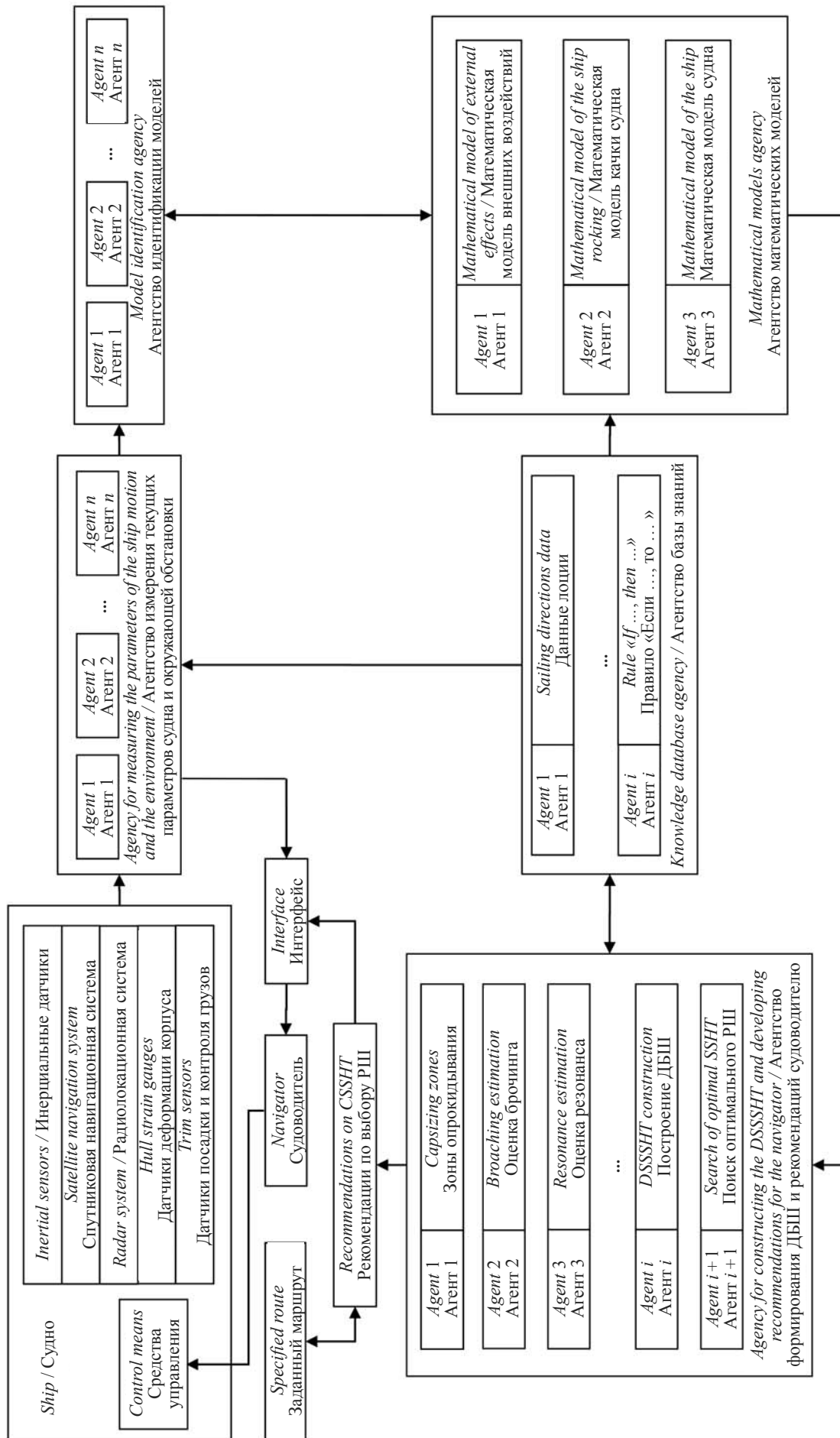


Fig. 4. Structure of the DSSSHT based on MAS

Рис. 4. Структура СППР ВРШ на основе МАС



MIA agents perception. Actually, the MMA is a «digital twin» of the reality surrounding the DSS CSSHT. The ship mathematical model (agent 3) takes into account the geometric, hydrodynamic and inertial characteristics of the hull.

The main DSS CSSHT agency is agency for constructing the DSSSHT and developing the recommendations for the navigator (ARN). Its agents estimate the probability of accidents, such as broaching, parametric resonance of the ship rocking, ship capsizing, etc. Each agent uses the MMA information to estimate its own accident. The interaction between the ARN agents allow the special agent  $i$  to construct the DSSSHT considering all the possible accidents. This DSSSHT enables estimating the safety of different SSHT, but the decision on the choice of the SSHT is made by the navigator on the basis of the DSS CSSHT recommendations. The development of such recommendations is performed by  $i+1$  agent. It solves the multi-criterion decision-making problem, the result of which is the recommended SSHT. At this, the DSS CSSHT knowledge database which includes information about the sailing conditions contained in the sailing directions, and a system of rules based on the recommendations of safe storm ship handling. The knowledge database is implemented as a special agency (KDA); it is adaptive. The recommendations developed by the ARN may be conducted by the navigator, or he may choose his own variant of SSHT. Since the DSS CSSHT obtains information about the navigator actions, including the specified route of ship motion, it is possible to estimate the effectiveness of the existing rules in the knowledge database and adapt them to the current situation during the storm ship handling.

A specialized interface is used to represent the information to the navigator. It displays the possible action options, highlighting the recommended one.

The holonic agents union in the ARN allows generating the resulting optimality criterion of the SSHT, taking into account the probability of potential accidents, the fuel cost and the travel time when sailing along the route specified by the navigator.

**CONCLUSIONS** 1. The concept of constructing the DSS CSSHT based on the holonic multi-agent systems HMAS is suggested in the article. This approach greatly simplifies solving the problems of software and computer engineering of complex navigation safety provision systems, implementing the artificial intelligence methods for the measurement information processing and navigator decision support in these systems.

2. The use of radar method for measuring the characteristics of seaway allows identifying the external effects, and then the mathematical model of the ship, which in turn will improve the accuracy of the developed recommendations for selecting the SSHT and short-term forecast of the ship dynamics.

3. Further studies will enable developing an intelligent decision support system capable of self-learning in the process of ship motion under the influence of external effects.

опрокидывание и т. д. Каждый агент использует информацию АММ для прогнозирования своей аварийной ситуации. Взаимодействие между агентами АРС позволяет специальному агенту  $i$  построить ДБШ с учетом всех возможных аварийных ситуаций. Данная ДБШ дает возможность определить безопасность различных РШ, однако решение о выборе РШ принимает судоводитель на основе рекомендаций СППР ВРШ. Формирование таких рекомендаций осуществляет агент  $i+1$ . Он совершает процесс многокритериального принятия решения, результатом которого является рекомендуемый РШ. При этом используется база знаний СППР ВРШ, которая включает информацию об условиях плавания, содержащуюся в лоции, и систему правил на основе рекомендаций безопасного штормования. База знаний реализована в виде специального агентства (АБЗ), она является адаптивной. Рекомендации, выработанные АРС, могут быть выполнены судоводителем, либо он может выбрать собственный вариант РШ. Поскольку СППР ВРШ получает информацию о действиях судоводителя, в том числе и о заданном маршруте движения судна, становится возможным оценивать эффективность имеющихся правил в базе знаний и корректировать их под текущую ситуацию в процессе штормования.

Для представления информации судоводителю используется специализированный интерфейс, который отображает возможные варианты действий, выделяя рекомендуемый вариант.

Холоническое объединение агентов в составе АРС позволяет сформировать результирующий критерий оптимальности РШ с учетом вероятности развития возможных аварийных ситуаций, затрат топлива и ходового времени при движении по заданному судоводителем маршруту.

**ВЫВОДЫ.** 1. Предложена концепция построения СППР ВРШ на основе ХМАС. Такой подход значительно упрощает решение задач программной и компьютерной инженерии сложных систем обеспечения безопасности мореплавания, реализацию в них методов искусственного интеллекта для обработки измерительной информации и поддержки принятия решений судоводителем.

2. Применение радиолокационного метода измерения характеристик морского волнения позволяет идентифицировать внешние возмущения, а затем и математическую модель судна, что, в свою очередь, повысит достоверность вырабатываемых рекомендаций по выбору РШ и краткосрочного прогноза динамики судна.

3. Дальнейшие исследования будут способствовать разработке интеллектуальной системы поддержки принятия решений, способной к самообучению в процессе движения судна под действием внешних возмущений.

**Список литературы**

- [1] **Бердинских, Б. В.** Оперативный контроль мореходности судна с использованием бортовой ЭВМ [Текст] : автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.08.01 / Б. В. Бердинских. — Николаев, 1981. — 13 с.
- [2] **Вагушенко, Л. Л.** Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности [Текст] / Л. Л. Вагушенко, А. Л. Вагушенко, С. И. Заичко. — Одесса : Фенікс, 2005. — 274 с.
- [3] **Еременко, А. П.** Нейросетевые алгоритмы оценивания погрешностей бесплатформенных инерциальных навигационных систем [Текст] / А. П. Еременко // Електротехніка і електромеханіка : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених. — Миколаїв : НУК, 2010. — С. 73–74.
- [4] **Еременко, А. П.** Нейросетевые алгоритмы определения метацентрической высоты морского подвижного объекта [Текст] / А. П. Еременко, А. К. Снигур // Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції ПРИЛАДОБУДУВАННЯ : стан і перспективи, 19–20 квітня 2011 р., м. Київ, ПБФ, НТУУ «КПІ». — 2011. — С. 23.
- [5] **Жеребецкий, А. В.** Холонические агенты в модели инжиниринговых процессов [Текст] / А. В. Жеребецкий, Ю. Д. Жуков // IV Міжнародна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». — Миколаїв : НУК, 2013. — С. 21–24.
- [6] **Жуков, Ю. Д.** Обеспечение штормовой безопасности малотоннажных судов при проектировании и эксплуатации [Текст] : дисс. ... д-ра техн. наук: 05.08.03 / Ю. Д. Жуков. — Николаев, 1994. — 269 с.
- [7] **Павлыгин, Э. Д.** Многоагентное моделирование окружающей обстановки морского судна [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Э. Д. Павлыгин. — Ульяновск, 2011. — 189 с.
- [8] **Полиметрические системы: теория и практика [Текст] : Монография / Ю. Д. Жуков, Б. Н. Гордеев, А. В. Зивенко, А. Ю. Грешнов, О. А. Зимица, В. Н. Чегринец, Е. О. Прищепов ; под ред. Ю. Д. Жукова. — Николаев : Атолл, 2012. — 382 с.**
- [9] **Управление судном [Текст] : учеб. для вузов / С. И. Демин, Е. И. Жуков, Н. А. Кубачев и др. ; под ред. В. И. Снопкова. — М. : Транспорт, 1991. — 359 с.**
- [10] **Управление судном и его техническая эксплуатация [Текст] : учебник для учащихся судоводит. спец. высш. инж. мор. училищ / Е. И. Жуков, М. Н. Либензон, М. Н. Письменный и др. ; под ред. А. И. Щетининой. — 3-е изд. — М. : Транспорт, 1983. — 655 с.**
- [11] **Ушаков, И. Е.** Радиолокационные методы и средства получения информации о состоянии морской поверхности [Текст] : дисс. ... д-ра техн. наук: 05.11.13 / И. Е. Ушаков. — Санкт-Петербург, 2001. — 230 с.
- [12] **Хоменко, Д. Б.** Разработка способа автоматического определения параметров морского волнения для повышения безопасности плавания судов [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.19 / Д. Б. Хоменко. — Владивосток, 2015. — 153 с.
- [13] **Gangeskar, R.** An Algorithm for Estimation of Wave Height from Shadowing in X-Band Radar Sea Surface Images [Text] / R. Gangeskar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2014. — vol. 52, no. 6, pp. 3373–3381.
- [14] **Gangeskar, R.** Ocean Current Estimated from X-Band Radar Sea Surface Images [Text] / R. Gangeskar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2002. — vol. 40, no. 4, pp. 783–792.
- [15] **Gerber, C.** Holonic Multi-Agent Systems. Research Report RR-99-03 [Electronic resource] / C. Gerber, J. Siekman, G. Vierende. — 1999. — Access Mode: URL: [http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2011/3775/pdf/RR\\_99\\_03.pdf](http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2011/3775/pdf/RR_99_03.pdf)
- [16] **Luo, Y.** A Multi-Agent Decision Support System for Stock Trading [Text] / Y. Luo, K. Liu, D. N. Davis // IEEE Network. — 2002. — no. 1/2, pp. 20–27.
- [17] **OCTOPUS-Onboard.** Ship Motions Monitoring and Advisory System [Electronic resource]. — Access Mode: URL: <http://www.amarcon.com/octopus-onboard.html>
- [18] **Polymetric Sensing in Intelligent Systems [Text] / Yu Zhukov, B. Gordeev, A. Zivenko, A. Nakonechny // Advances in Intelligent Robotics and Collaborative Automation. Ed. by Y. P. Kondratenko, R. J. Duro, 2015. — P. 211–234.**
- [19] **X-Band Radar as a Tool to Determine Spectral and Single Waves Properties [Electronic resource] / K. Reischert, K. Hessner, J. Dannenberg, I. Trankmann, B. Lund // Proc. of Fifth International Symposium WAVES 2005, Madrid, Spain. — 2005. — Access Mode: URL: [http://www.oceanwaves.org/download/PDF/OWS\\_WAVES2005.pdf](http://www.oceanwaves.org/download/PDF/OWS_WAVES2005.pdf)**
- [20] **WaMoS II.** Description and Technical Information [Electronic resource]. — Access Mode: URL: <http://www.oceanwaves.org/basics.html>

---

© Ю. Д. Жуков, А. П. Еременко

Статью рекомендует в печать  
д-р техн. наук, проф. Павлов Г. В.