



**Oleksandr V.
Bondarenko**
Бондаренко
Александр
Валентинович

УДК 629.5.01
Б81

CHOICE OF OPTIMAL MAIN PARTICULARS OF THE WIND FARM SERVICE VESSELS

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВ ДЛЯ ДОСТАВКИ ПЕРСОНАЛА НА ШЕЛЬФОВЫЕ ВЕТРОЭЛЕКТРОПАРКИ

DOI 10.15589/SMI. 2015.02.06

Oleksandr V. Bondarenko А. В. Бондаренко, канд. техн. наук, доц.
Oleksandr.Bondarenko@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0002-6115-1422

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Nikolaev

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, г. Николаєв

Abstract. In the article the question of conceptual design of Wind farm service (support) vessel (WFSV). The choice of project descriptions of WFSV it is suggested to execute by the design of environment in that it is foreseen to exploit a ship. The optimization task of choice of project descriptions of WFSV is set forth. For her decision a genetic algorithm is used. As a objective function a minimum of charges is accepted on repair and maintenance of wind farm. Description over of mathematical model of project descriptions and model of functioning of WFSV is brought. Methodology of evaluation of economic efficiency, basis of that is made by the methods of statistical design, theory of probability and theory of reliability, is worked out. Software is worked out, giving an opportunity to visualize the process of functioning of WFSV and wind farm. The got results it can draw on in project organizations for determination of main particulars

Keywords: Wind farm service (support) vessel; offshore wind park; mathematical model; failures; genetic algorithm; model of function; efficiency; optimization.

Анотація. Розглянуто питання концептуального проектування суден для доставки персоналу на шельфові вітроелектропарки — WFSV. Сформульовано оптимізаційну задачу вибору проектних характеристик WFSV. Для її вирішення використано генетичний алгоритм. Наведено опис математичної моделі вибору проектних характеристик та моделі функціонування WFSV.

Ключові слова: судно для доставки персоналу; шельфовий вітроелектропарк; математична модель; аварійна подія; генетичний алгоритм; модель функціонування; ефективність; оптимізація.

Аннотация. Рассмотрен вопрос концептуального проектирования судов для доставки персонала на шельфовые ветроэлектростанции — WFSV. Сформулирована оптимизационная задача выбора проектных характеристик WFSV. Для ее решения использован генетический алгоритм. Приведено описание математической модели выбора проектных характеристик и модели функционирования WFSV.

Ключевые слова: судно для доставки персонала; шельфовый ветроэлектропарк; математическая модель; аварийное событие; генетический алгоритм; модель функционирования; эффективность; оптимизация.

References

- [1] Boyko A.P., Bondarenko A.V. Primenenie geneticheskogo algoritma dlya vybora optimalnykh kharakteristik passazhirskikh sudov s maloy ploshchadyu vaterlinii [Application of a genetic algorithm to select the optimal characteristics of passenger small waterplane area twin hull ships]. *Materialy I mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi»* (15–17.09.2010) [Proceedings of the 1st International Scientific and Technical Conference «Innovations in shipbuilding and ocean engineering»]. Mykolaiv, 2010, pp. 99–102.
- [2] Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. *Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2013. 384 p.
- [3] Ryabinin I.A. *Nadezhnost i bezopasnost strukturno-slozhnykh sistem* [Reliability and safety of the structurally complex systems]. Saint Peterburg, Sankt Peterburgskogo universiteta Publ., 2007. 276 p.

- [4] Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. *Modelirovanie sistem* [System modeling]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2009. 342 p.
- [5] Chan V. *Theory and Applications of Monte Carlo Simulations*. InTech, 2013. 284 p.
- [6] Dalgic Y. *Optimum CTV fleet selection for offshore wind farm O&M activities*. Safety and Reliability: Methodology and Applications, London, CRC Press, 2014. pp.1177–1185.
- [7] *Global Wind Report: Annual Market Update 2014*. Available at: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf.
- [8] Grubisic I. Reliability of Weight Prediction in the Small Craft Concept Design. *Proceedings of the 6th international conference on high-performance marine vehicles «HIPER 2008»* (18–19 September 2008). Naples, 2008. pp. 215–226.
- [9] Jupp M., Sime R., Dudson E. XSS – A Next Generation Windfarm Support Vessel. *International Conference «Design & Operation of Wind Farm Support Vessels»* (29–30.01.2014). London, 2014. 8 p.
- [10] Kahrobaee S., Asgarpoor S. *Risk-Based Failure Mode and Effect Analysis for Wind Turbines (RB-FMEA)*. Available at: <http://digitalcommons.unl.edu/electricalengineeringfacpub/172>.
- [11] Law A. M. *Simulation modeling and analysis*: 5th edition. New York, McGraw-Hill Publ., 2015. 804 p.
- [12] Molland A. F., Karayannis T., Taunton D. J., Sarac-Williams Y. Preliminary estimates of the dimensions, powering and seakeeping characteristics of fast ferries. International marine design. *International marine design conference, IMDC 2003*. pp. 47–60.
- [13] Moraes H. B., Vasconcellos J. M., Almeida P. M. Multiple criteria optimization applied to high speed catamaran preliminary design. *Ocean Engineering*, 2007, no. 34, pp. 133–147.
- [14] Oosterveld M., Oosamen P. Further Computer Analyzed Data of the Wageningen B-Screw Series. *International Shipping Progress*, 1975, vol. 22, no. 251, July, pp. 3–14.
- [15] Stewart W. J. *Probability, Markov Chains, Queues, and Simulation: The Mathematical Basis of Performance Modeling*. Princeton, Princeton University Press, 2009. 776 p.
- [16] Van Terwisga, J. C. A parametric propulsion prediction method for waterjet driven craft. *Proceedings of the 4th International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '97), July 21–23, 1997*. Sydney, Baird Publications, 1997, pp. 661–668.
- [17] Zips J. M. Numerical Resistance Prediction based on the Results of the VWS Hard Chine Catamaran Hull Series «89». *Proceedings of the Third International Conference on Fast Sea Transportation (Fast '95), September 25–27*. Lubeck, Travemunde, Germany, 1995. pp. 67–74.

Problem statement. In the present-day global community, great attention is paid to development of renewable energy sources. One of the promising options is building wind farms (WF) operating in the offshore zone.

As evidenced by the statistical data, by the end of 2014 the total capacity of WF made up 8759 MW worldwide [7] (only during the last year, new WF of the 1647 MW total capacity were introduced; more than 90% of them were installed in offshore waters of the European Union countries).

Development of the offshore wind energetics is also of interest for the shipbuilding industry, since providing assembling, commissioning, maintenance and repair requires a whole range of vessels: foundations and wind turbines installing vessels, substation assembling vessels, cable laying vessels, special personnel transfer vessels, hydrographic vessels, service vessels, underwater vehicles etc.

Expenses associated with maintenance and repair of turbines constitute a considerable proportion of the cost

Постановка проблемы. В современном мировом сообществе большое внимание уделяется развитию возобновляемых источников энергии. Одним из перспективных вариантов является строительство ветроэлектростанций (ВЭП), функционирующих в шельфовой зоне.

Как свидетельствуют статистические данные, по состоянию на конец 2014 года общая мощность таких ВЭП в мире составляла 8759 МВт [7] (только за последний год введено новых ВЭП общей мощностью 1647 МВт, более 90% которых установлено в шельфовых водах стран Евросоюза).

Развитие оффшорной ветроэнергетики представляет интерес и для судостроительной отрасли, поскольку для обеспечения монтажа, пуско-наладочных работ, обслуживания и ремонта требуется целый комплекс судов: для установки фундаментов и ветротурбин, для монтажа подстанций, кабелеукладчики, для доставки спецперсонала, гидрографические, обслуживающие, подводные аппараты и т. д.

Значительную долю в стоимости электроэнергии, вырабатываемой ВЭП, составляют расходы,

of the WF generated electricity. Transferring of operating personnel, their tools, materials, equipment, spare parts and other goods to the turbines, carrying out inspection activities, performing diving operations and preventive measures, and cleaning turbine columns are performed by special vessels — wind farm service (support) vessel (WFSV). These vessels can also be adapted to transfer fuel for the WF generator. In addition to these functions, WFSV are used to provide work of cable laying vessels and support diving operations during the WF installation.

One of the ways of reducing the cost of energy is cutting the WFSV construction and operation expenses by optimizing their basic technical and operational characteristics.

Designing of such vessels is associated with some difficulties and requires development of mathematical models for determination of their principal dimensions, assessment of efficiency and safety of their operation. For this purpose, it is advisable to use the advanced framework of simulation modeling, as well as the theory of reliability, safety and risk [3–5, 11, 15].

In view of the novelty and the lack of substantial experience in the WFSV designing and construction, the problem of the selection of the optimal principal characteristics of the offshore wind farm service vessels is poorly studied and urgent.

Latest research and publications analysis. The analysis of scientific literature carried out by the author has shown that there are hardly any publications on the subject matter. Applying traditional techniques for designing high-speed passenger catamarans does not seem possible due to the specific nature of the WFSV operation. At the same time, some algorithms of these methods can be used in the selection of the optimal principal characteristics of the offshore wind farm service vessels.

Solution to some issues related to the design and research of the WFSV operation efficiency can be found in [6, 9]. In particular, [9] describes the algorithm for the selection of the optimal WFSV hull shape, and [6] shows the model for assessment of efficiency and selection of the best WFSV option from a given set. However, these studies do not address the question of the selection of the optimal principal dimensions of the vessel.

Based on the above stated, it can be concluded that there is the need for developing comprehensive technique for the selection of the optimal WFSV design characteristics which would take into account the special features of their operation.

THE ARTICLE AIM is to develop the technique for the selection of the optimal WFSV design characteristics.

Basic material. The previously performed analysis of the architectural and structural types of the built vessels showed that more than 86% of them were catama-

связанные с обслуживанием и ремонтом турбин. Доставку к турбинам обслуживающего персонала, его инструмента, материалов, оборудования, запасных частей и других грузов, проведение инспекционных мероприятий, выполнение водолазных и профилактических работ, очистку колонн турбин выполняют специальные суда — Wind farm service (support) vessel (WFSV). Также эти суда могут быть приспособлены для доставки топлива для генератора ВЭП. Кроме этих функций, на этапе монтажа ВЭП WFSV используются для обеспечения работ судов-кабелеукладчиков, поддержки водолазных операций.

Одним из путей снижения стоимости электроэнергии является уменьшение расходов на строительство и эксплуатацию WFSV за счет оптимизации их основных технических и эксплуатационных характеристик.

Проектирование таких судов связано с некоторыми трудностями и требует разработки математических моделей для определения их главных размеров, оценки эффективности и безопасности эксплуатации. Для этого целесообразно применить современный аппарат имитационного моделирования, теории надежности, безопасности и риска [3–5, 11, 15].

Ввиду новизны и отсутствия значительного опыта проектирования и строительства WFSV, проблема выбора оптимальных основных характеристик судов для доставки персонала на шельфовые ВЭП является малоизученной и актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций. Проведенный автором анализ научной литературы показал практически полное отсутствие публикаций по данной тематике. Употребить традиционные методики для проектирования скоростных пассажирских катамаранов, не представляется возможным, ввиду специфики эксплуатации WFSV. В то же время, отдельные алгоритмы этих методик можно использовать при выборе оптимальных основных характеристик судов для доставки персонала на шельфовые ВЭП.

Решение некоторых вопросов, связанных с проектированием и исследованием эффективности эксплуатации WFSV, можно найти в работах [6, 9]. В частности в [9] описан алгоритм выбора оптимальной формы корпуса WFSV, а в [6] — модель оценки эффективности и выбора наилучшего варианта WFSV из заданного множества. Но в указанных работах не рассматривается вопрос выбора оптимальных главных размеров судна.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о необходимости создания комплексной методики выбора оптимальных проектных характеристик WFSV, учитывающей особенности их эксплуатации.

ЦЕЛЬЮ СТАТЬИ является разработка методики выбора оптимальных проектных характеристик судов для доставки персонала на шельфовые ВЭП.

Изложение основного материала. Предварительно проведенный анализ архитектурно-конструк-

rans. Therefore, this paper considers the development of the technique for the selection of the optimal characteristics of WFSV of the catamaran type.

It is reasonable to perform the selection of the optimal WFSV design characteristics by the means of solving the optimization problem in the following formulation:

$$F(X, C) \rightarrow \min(\max), X \in D \subset R^n;$$

$$D = \{X \in R^n \mid g_j(X, C) \geq 0,$$

$$j \in [1, p], g_l(X, C) = 0, l \in [p+1, k]\},$$

where $F(X, C)$ is the optimization criterion; $C(C_1, \dots, C_m)$ is the vector of the parameters forming the design assignment; m is the number of the C vector parameters; $X(x_1, \dots, x_n)$ is the vector of independent variables, n is the number of independent variables; k is the total number of the problem's constraints; p is the number of the problem's constraints in the form of inequations, D is the permissible search area.

The aim of solving the optimization problem is to minimize the WF repair and maintenance expenses, thus, the optimization criterion appears as follows:

$$F(X, C) = C_p + C_s + C_o + C_L,$$

where C_p is the cost of spare parts and other materials necessary for the turbine repair or maintenance; C_s is the service (personnel transfer) cost; C_o is the cost of electricity lost due to the turbine downtime; C_L is the cost of works related to the fault repair.

The cost of electricity lost due to the downtime of the i th turbine is determined according to the work data [10] using the following formula:

$$C_o(i) = D_F(i) \bar{P}_{out} EPR, \quad (1)$$

where $D_F(i)$ is the time of the turbine repair, hours; \bar{P}_{out} is the average amount of the electricity generated by the turbine, kWh; EPR is the average cost of one megawatt of the electricity generated, UAH/kWh.

The cost of works related to the fault repair is determined as follows:

$$C_L(i) = D_F(i) N_C MHR,$$

where N_C is the number of people in the operating personnel required to perform the repair (Table 1); MHR is the average cost of one standard hour.

The value of the cost of service is calculated according to the following formula:

$$C_S = C_{dp} + C_{rm} + C_{sal} + C_{ins} + C_{adm} + \sum_{i=1}^m C_{fuel}(i),$$

where C_{dp} is the amortization expenses; C_{rm} is the current repair and maintenance expenses; C_{sal} is the crew expenses; C_{ins} is the insurance expenses; C_{adm} is the administration expenses; $C_{fuel}(i)$ is the cost of fuel and oil.

тивных типов построенных судов показал, что более 86% из них являются катамаранами. Поэтому в данной работе разработана методика выбора оптимальных параметров WFSV катамаранного типа.

Целесообразно выбор оптимальных проектных характеристик WFSV выполнять путем решения оптимизационной задачи в следующей постановке:

$$F(X, C) \rightarrow \min(\max), X \in D \subset R^n;$$

$$D = \{X \in R^n \mid g_j(X, C) \geq 0,$$

$$j \in [1, p], g_l(X, C) = 0, l \in [p+1, k]\},$$

где $F(X, C)$ — критерий оптимизации; $C(C_1, \dots, C_m)$ — вектор параметров, формирующих задание на проектирование; m — количество параметров вектора C ; $X(x_1, \dots, x_n)$ — вектор независимых переменных, n — количество независимых переменных; k — общее количество ограничений задачи; p — количество ограничений задачи в виде неравенств, D — допустимая область поиска.

Цель решения оптимизационной задачи — минимизация расходов на ремонт и обслуживание ВЭП, таким образом, критерий оптимизации имеет следующий вид:

$$F(X, C) = C_p + C_s + C_o + C_L,$$

где C_p — стоимость запчастей и других материалов, необходимых для выполнения ремонта или обслуживания турбины; C_s — стоимость обслуживания (доставки персонала); C_o — стоимость электроэнергии, потерянной в результате простоя турбины; C_L — стоимость работ, связанных с устранением неисправности.

Стоимость электроэнергии, потерянной в результате простоя i -й турбины, определяется в соответствии с данными работы [10] по формуле:

$$C_o(i) = D_F(i) \bar{P}_{out} EPR, \quad (1)$$

где $D_F(i)$ — время ремонта турбины, час; \bar{P}_{out} — среднее количество вырабатываемой турбиной электроэнергии, кВт час; EPR — средняя стоимость одного мегаватта вырабатываемой электроэнергии, грн/кВт час.

Стоимость работ, связанных с устранением неисправности, определяется таким образом:

$$C_L(i) = D_F(i) N_C MHR,$$

где N_C — требуемое для выполнения ремонта количество обслуживающего персонала (табл. 1); MHR — средняя стоимость одного нормо-часа

Значение стоимости обслуживания рассчитывается по формуле:

$$C_S = C_{dp} + C_{rm} + C_{sal} + C_{ins} + C_{adm} + \sum_{i=1}^m C_{fuel}(i),$$

где C_{dp} — амортизационные отчисления; C_{rm} — расходы на текущий ремонт и обслуживание; C_{sal} — расходы на экипаж; C_{ins} — расходы на страхование; C_{adm} — административные расходы; $C_{fuel}(i)$ — стоимость топлива и масла.

Table 1. Basic standards for the maintenance/repair of the wind turbine parts

Таблица 1. Основные нормативы на обслуживание/ремонт элементов ветротурбины

Name of work item / Наименование работы	Failure rate, times/year Интенсивность отказов, время/год	Work time, hours Время работы, часов	Number of technicians Количество техников	Cost of work, \$ Стоимость работы, \$
Manual restart / Ручной перезапуск	8.79	1	2	–
Blades / Лопасти	1.48	8	2	20300
Blade rotation system / Система поворота	0.08	5	2	7150
Hub / Ступица	0.185	4	2	4300
Main shaft and bearings / Главный вал и подшипники	0.185	4	2	14000
Gear box / Редуктор	0.08	4	2	3250
High speed shaft / Высокоскоростной вал	0.19	3	2	3250
Brake unit / Тормозное устройство	0.04	2	2	2500
Electric generator / Электрогенератор	0.08	4	2	12000
Control system / Система управления	0.24	4	2	4150
Gondola rotation system / Система поворота гондолы	0.12	3	2	10800
Hydraulic system / Гидравлическая система	0.12	3	2	1300
Power cable / Силовой кабель	0.24	3	2	4150
Transformer / Трансформатор	0.02	5	2	15400
Tower / Башня	0.19	8	2	5000

The vector of independent variables includes the following WFSV characteristics: the length of the vessel hull $x_1 = L_H$; the relative length of the vessel hull $x_2 = l = \frac{L_{WL}}{\sqrt[3]{V}}$, the ratio of the width of one vessel hull to the draft $x_3 = B_x/d_x$, the ratio of the horizontal clearance to the length $x_4 = \frac{S_x}{L_{WL}}$, the ratio of the length of the vessel to the width of a hull $x_5 = \frac{L_{WL}}{B_x}$, the maximum speed of the vessel $x_6 = V_s$, the number of people in the operating personnel $x_7 = N_{per}$.

The permissible search area D is formed on the basis of the system of direct and functional constraints organized as the inequations $g(X, C) \geq 0$. The direct constraints are imposed directly on the components of the vector of independent variables and the components of the input parameters:

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, i = 1, \dots, n.$$

The functional constraints include requirements for the WFSV technical properties:

$$A_j(X) \leq a_j,$$

where $A_j(X)$ and a_j are the calculated value and the required value of the vessel qualities correspondingly.

The system of functional constraints of the problem contains requirements for nautical properties of the vessel, as well as constraints imposed by the algorithms of the propulsion calculation. It is advisable to solve the problem with the use of a genetic algorithm [1, 2]. Choosing this method of optimization is accounted for its ability to work with many variables, simultaneous search from several space points, and the effectiveness of search, i.e. the high speed of finding an optimal solu-

Вектор независимых переменных включает следующие характеристики WFSV: длина корпуса судна $x_1 = L_H$; относительная длина судна $x_2 = l = \frac{L_{WL}}{\sqrt[3]{V}}$, отношение ширины одного корпуса судна к осадке $x_3 = B_x/d_x$, отношение горизонтального клиренса к длине $x_4 = \frac{S_x}{L_{WL}}$, отношение длины судна к ширине одного корпуса $x_5 = \frac{L_{WL}}{B_x}$, максимальная скорость судна $x_6 = V_s$, количество обслуживающего персонала $x_7 = N_{per}$.

Допустимая область поиска D сформирована на основе системы прямых и функциональных ограничений в виде неравенств $g(X, C) \geq 0$. Прямые ограничения накладываются непосредственно на компоненты вектора независимых переменных и компоненты входных параметров:

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, i = 1, \dots, n.$$

Функциональные ограничения включают требованиям к техническим качествам WFSV:

$$A_j(X) \leq a_j,$$

где $A_j(X)$ и a_j — расчетные и требуемые значения качеств судна, соответственно.

Система функциональных ограничений задачи содержит требования к мореходным качествам судна, а также ограничения, накладываемые алгоритмами расчета ходкости. Решение такой задачи целесообразно провести с использованием генетического алгоритма [1, 2]. Выбор такого метода оптимизации объясняется возможностью его работы со многими переменными, одновременным проведением поиска из нескольких точек пространства, и эффективностью поиска, т. е. высокой скоростью нахождения оптимального решения. Таким образом, предложена

tion. Thus, the mathematical model of the vessel is suggested. It includes the following components: principal dimensions, propulsion, load mass, trim and stability, construction cost and efficiency. The model is based on the scientific achievements [8, 12] improved by the author as applied to vessels of the WFSV type, as well as regression curves obtained independently. The block diagram of the model is shown in Fig. 1.

The WFSV principal dimensions (Fig. 2) is determined according to the following dependences:

математическая модель судна, включающая в себя следующие блоки: главные размерения, ходкость, нагрузка масс, посадка и остойчивость, строительная стоимость и эффективность. В основу модели положены научные наработки [8, 12], усовершенствованные автором применительно к судам типа WFSV, а также регрессионные зависимости, полученные самостоятельно. Блок-схема этой модели представлена на рис. 1.

Главные размерения WFSV (рис. 2) определяются по следующим зависимостям:

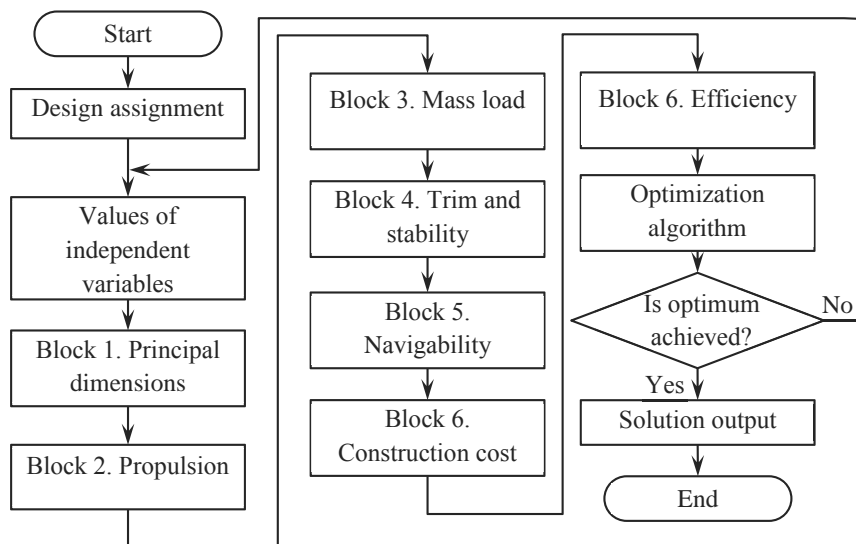


Fig. 1. Block diagram of the mathematical model of the vessel

Рис. 1. Блок-схема математической модели судна

Start — Начало; Design assignment — Задание на проектирование; Values of independent variables — Значения независимых переменных; Block 1. Principal dimensions — Блок 1. Главные размерения; Block 2. Propulsion — Блок 2. Ходкость; Block 3. Mass load — Блок 3. Нагрузка масс; Block 4. Trim and stability — Блок 4. Посадка и остойчивость; Block 5. Navigability — Блок 5. Мореходность; Block 6. Construction cost — Блок 6. Строительная стоимость; Block 7. Efficiency — Блок 7. Эффективность; Optimization algorithm — Алгоритм оптимизации; Is optimum achieved? — Оптимум достигнут?; Solution output — Вывод решения; End — Конец

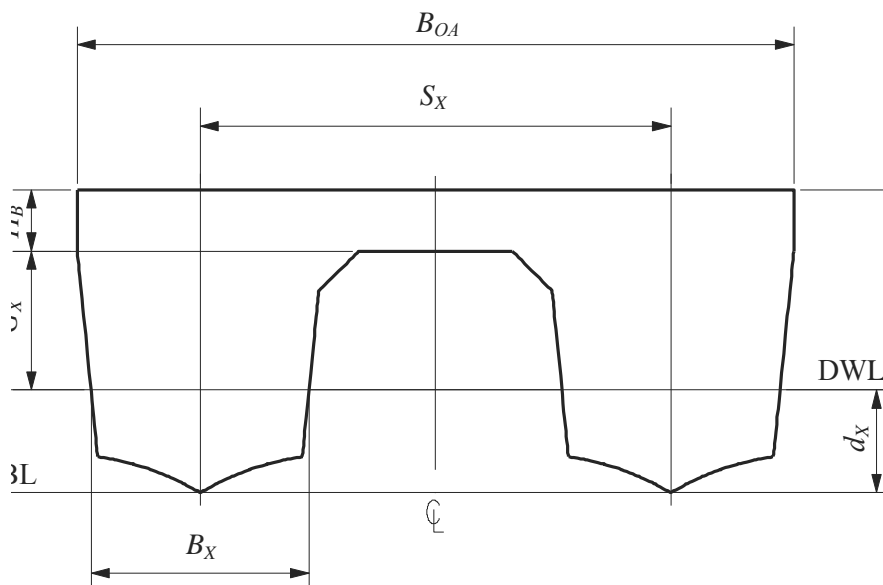


Fig. 2. Determining the catamaran dimensions

Рис. 2. Определение размерений катамарана

Waterline length, m:

$$L_{WL} = 0,9274L_H - 0,5503.$$

Width of a hull, m:

$$B_x = \frac{L_{WL}}{x_5}.$$

Volume displacement of a hull, m³:

$$\nabla_1 = \left(\frac{L_{WL}}{l} \right)^3.$$

Full displacement of the vessel, t:

$$\Delta = 2\rho_w \nabla_1;$$

Trim, m:

$$d_x = \frac{B_x}{x_3}.$$

Horizontal clearance, m:

$$S_x = L_{WL} x_4.$$

Overall width of the vessel, m:

$$B_{OA} = S_x + B_x.$$

Hull height of the vessel to the main deck, m:

$$D_x = d_x + G_x + H_B.$$

Block coefficient of fineness:

$$C_B = \frac{\nabla_1}{L_{WL} B_x d_x}.$$

Bridge height, m:

$$H_B = 0,0648e^{0,2977B_{OA}}.$$

Vertical clearance, m:

$$G_x = k \frac{h_{1/3}}{2},$$

where $h_{1/3}$ is the significant wave height, m; k is the coefficient determined on the basis of the statistical data, $k > 1$.

The obtained values of the principal dimensions of the vessel are further used in Block 2 for calculation of resistance and capacity of the main engines.

Determination of capacity of the WFSV main engines can be carried out with the help of various familiar methods used when calculating propulsion of high speed catamarans. This model implements the method published in [17], whereby resistance in still water is calculated by the following formula:

$$R_T = R_F + (\varepsilon_R \nabla \rho_w g),$$

where R_F is the friction resistance; ∇ is the volume displacement; g is the gravity acceleration; ρ_w is the density of sea water; ε_R is the ratio of residual resistance to weight:

$$\varepsilon_R = \frac{X_R C_R}{100}.$$

Values of the regression equation coefficients X_R and the residual resistance coefficient C_R are given in [17].

Длина по ватерлинии, м:

$$L_{WL} = 0,9274L_H - 0,5503.$$

Ширина одного корпуса, м:

$$B_x = \frac{L_{WL}}{x_5}.$$

Объемное водоизмещение одного корпуса, m³:

$$\nabla_1 = \left(\frac{L_{WL}}{l} \right)^3.$$

Полное водоизмещение судна, т:

$$\Delta = 2\rho_w \nabla_1;$$

Осадка, м:

$$d_x = \frac{B_x}{x_3}.$$

Горизонтальный клиренс, м:

$$S_x = L_{WL} x_4.$$

Габаритная ширина судна, м:

$$B_{OA} = S_x + B_x.$$

Высота борта судна до главной палубы, м:

$$D_x = d_x + G_x + H_B.$$

Коэффициент общей полноты:

$$C_B = \frac{\nabla_1}{L_{WL} B_x d_x}.$$

Высота моста, м:

$$H_B = 0,0648e^{0,2977B_{OA}}.$$

Вертикальный клиренс, м:

$$G_x = k \frac{h_{1/3}}{2},$$

где $h_{1/3}$ — высота значительных волн, м; k — коэффициент, определенный на основе статистических данных, $k > 1$.

Полученные значения главных размерений судна далее используются в Блоке 2 для расчета сопротивления и мощности главных двигателей.

Определение мощности главных двигателей WFSV может быть выполнено различными известными методами, используемыми при расчете ходкости скоростных катамаранов. В данной модели применен метод, опубликованный в работе [17], в соответствии с которым сопротивление на тихой воде рассчитывается по формуле:

$$R_T = R_F + (\varepsilon_R \nabla \rho_w g),$$

где R_F — сопротивление трения; ∇ — объемное водоизмещение; g — ускорение свободного падения; ρ_w — плотность морской воды; ε_R — отношение остаточного сопротивления к весу:

$$\varepsilon_R = \frac{X_R C_R}{100}.$$

Значения коэффициентов уравнения регрессии X_R и коэффициента остаточного сопротивления C_R приведены в [17].

The capacity of the main engines can be calculated as follows:

$$P_I = \frac{R_T V}{\eta_D \eta_G \eta_S} (1 + M_S),$$

where η_D is the propulsive coefficient; η_G is the coefficient of the reduction gear useful effect; η_S is the coefficient of the shaft line efficiency; M_S is the coefficient of sea margin.

The propulsive coefficient η_D depends on the type of the propeller. The algorithm given in the publication [16] is used for water jets, and the one published in [14] is used for screws.

Calculation of full displacement is performed according to the following dependence:

$$\Delta = W_{LS} + DW,$$

where Δ is the full displacement, t; W_{LS} is the light vessel displacement, t; DW is the deadweight, t.

It is reasonable to obtain the deadweight using the formula:

$$DW = W_{PL} + W_{Foil} + W_C + W_{FW} + W_{SR},$$

where W_{PL} is the payload weight, t; W_{Foil} is the fuel and oil weight, t; W_{CR} is the crew weight, t; W_{FW} is the water weight, t; W_{SR} is the provisions weight, t.

The algorithm for determination of components of the light vessel mass load is based on the data given in the articles [8, 12]. According to them, the light vessel displacement W_{LS} is calculated as a sum of the hull weight W_{Hull} , the power plant weight W_M , the equipment weight W_{Out} and the sea margin weight W_{SM} :

$$W_{LS} = W_{Hull} + W_M + W_{Out} + W_{SM}$$

The hull weight is equal to:

$$W_{Hull} = W_{Str} + W_{Sup}$$

The catamaran hull structures weight depends on the material and is characterized with the following ratio:

$$W_{Str} = K_S E_S^{1,33},$$

where E_S is the module; K_S is the coefficient taking into account the type of the hull material: for the aluminum-magnesium alloy $K_S = 0,002 + 0,0064G_f S_f$, for fiberglass $K_S = 0,0135G_f S_f - 0,0034$; S_f , G_f are the coefficients taking into account the region of operation and the purpose of the vessel correspondingly.

Calculation of the reduced area S_R is carried out using the bottom surface area S_1 , the shipboard surface area S_2 , the deck surface area S_3 , the bulkheads surface area S_4 and the catamaran interconnect (bridge) surface area S_5 with the help of the following dependences:

$$S_1 = 2\nabla_1^{1/3} (3,51\nabla_1^{1/3} + 0,568L_{WL}), \text{ m}^2;$$

$$S_2 = 2,1(L_{OA} + L_{WL})(D_X - d_X), \text{ m}^2;$$

$$S_3 = 2,3L_{OA}B, \text{ m}^2;$$

$$S_4 = 1,3N_{WTB}C_M B_X D_X, \text{ m}^2;$$

$$S_5 = 0,92L_{WL}(S_X - 1,4B_X)(1,96 + H_C), \text{ m}^2;$$

Мощность главных двигателей находим следующим образом:

$$P_I = \frac{R_T V}{\eta_D \eta_G \eta_S} (1 + M_S),$$

где η_D — пропульсивный коэффициент; η_G — коэффициент полезного действия редуктора; η_S — КПД валопровода; M_S — коэффициент морского запаса.

Пропульсивный коэффициент η_D зависит от типа движителя. Для водометов используется алгоритм, приведенный в работе [16], а для винтов — в [14].

Расчет полного водоизмещения выполняется по следующей зависимости:

$$\Delta = W_{LS} + DW,$$

где Δ — полное водоизмещение, т; W_{LS} — водоизмещение судна порожнем, т; DW — дедвейт, т.

Дедвейт целесообразно получить по формуле:

$$DW = W_{PL} + W_{Foil} + W_C + W_{FW} + W_{SR},$$

где W_{PL} — масса полезной нагрузки, т; W_{Foil} — масса топлива и масла, т; W_{CR} — масса экипажа, т; W_{FW} — масса воды, т; W_{SR} — масса провизии, т.

В основу алгоритма определения составляющих нагрузки масс судна порожнем положены сведения из статей [8, 12]. В соответствии с ними водоизмещение порожнем W_{LS} рассчитывается как сумма масс корпуса W_{Hull} , энергетической установки W_M , оборудования W_{Out} и запаса водоизмещения W_{SM} :

$$W_{LS} = W_{Hull} + W_M + W_{Out} + W_{SM}$$

Масса корпуса равна:

$$W_{Hull} = W_{Str} + W_{Sup}$$

Масса конструкций корпуса катамарана зависит от материала и характеризуется соотношением:

$$W_{Str} = K_S E_S^{1,33},$$

где E_S — модуль; K_S — коэффициент, учитывающий тип материала корпуса: для алюминийно-магниевого сплава — $K_S = 0,002 + 0,0064G_f S_f$, для стеклопластика — $K_S = 0,0135G_f S_f - 0,0034$; S_f , G_f — коэффициенты, учитывающие район эксплуатации и назначение судна соответственно.

Расчет общей приведенной площади S_R выполнен через площади поверхности днища S_1 , бортов S_2 , палубы S_3 , переборки S_4 и соединительной конструкции (моста) катамарана S_5 с помощью следующих зависимостей:

$$S_1 = 2\nabla_1^{1/3} (3,51\nabla_1^{1/3} + 0,568L_{WL}), \text{ m}^2;$$

$$S_2 = 2,1(L_{OA} + L_{WL})(D_X - d_X), \text{ m}^2;$$

$$S_3 = 2,3L_{OA}B, \text{ m}^2;$$

$$S_4 = 1,3N_{WTB}C_M B_X D_X, \text{ m}^2;$$

$$S_5 = 0,92L_{WL}(S_X - 1,4B_X)(1,96 + H_C), \text{ m}^2;$$

где ∇_1 — объемное водоизмещение одного корпуса; N_{WTB} — количество водонепроницаемых переборок катамарана; C_M — коэффициент полноты площади мидель-шпангоута.

where ∇_1 is the volume displacement of a hull; N_{WTB} is the number of water-resistant catamaran bulkheads; C_M is the coefficient of fineness of the amidship section area.

The total reduced area S_R will be equal to:

$$S_R = S_1 + 0,73S_2 + 0,71S_3 + 0,67S_4 + 0,81S_5,$$

The module is determined as follows:

$$E_S = f_{R1} f_{R2} S_R, \text{ M}^2,$$

where f_{R1} is the correction factor taking into account the influence of the ratio of the trim to the hull height:

$$f_{R1} = 1,15 \left(\frac{d_X}{D_X} \right)^{0,25};$$

f_{R2} is the correction factor taking into account the influence of the volume displacement of a catamaran hull:

$$f_{R2} = 0,7 + 2,37(1,26 + L_{WL}) \nabla_1 / L_{WL}^3.$$

The weight of the superstructure can be calculated as follows:

$$W_{Sup} = g_{Sup} V_{Sup}, \text{ t},$$

where g_{Sup} is the catamaran superstructure weight indicator; V_{Sup} is the superstructure volume.

The equipment weight is obtained with the use of the following formula:

$$W_{Out} = 0,03L_{OA}B.$$

The power plant weight including the weight of the main and auxiliary engines, propellers and gear boxes is determined as follows:

$$W_M = W_P + W_{Rm},$$

where W_P is the propulsion complex weight: $W_P = W_D + W_{GB} + W_{WJ}$; $W_D = 6,82 \left(\frac{P_I}{RPM} \right)^{0,85}$ is the weight of the main engines, $W_{GB} = 0,00348P_I^{0,75}$ is the weight of gear boxes; $W_{WJ} = 0,00018P_I^{1,18}$ is the weight of water jets; $W_{Rm} = 0,55W_P$ is the weight of other mechanisms and the power plant equipment; RPM is the number of revolutions of the main engine.

As a rule, the displacement margin is given in in percentage of the full displacement of the vessel Δ :

$$W_{SM} = 0,025\Delta, \text{ t}.$$

The assessment of the cost of the vessel construction at the initial stage of designing is performed according to the correlations [13]:

$$C_{TA} = C_{est} + C_{eq} + C_{ma},$$

where C_{est} is the cost of materials and works when constructing the hull; C_{eq} is the cost of equipment; C_{ma} is the cost of machinery.

The value C_{est} is calculated as follows:

$$C_{est} = [1,1W_{Hull}M] + [W_{Hull}L_{Work}H],$$

where M is the cost of one ton of the hull material; H is the cost of one standard hour; L_{Work} is the labor content of constructing the hull, standard hours.

The cost of machinery is equal to:

$$C_{ma} = 1,4(C_D + C_{GB} + C_{WJ}),$$

where C_D is the cost of the main engines; C_{GB} is the cost of gear boxes; C_{WJ} is the cost of water jets or propellers.

Общая приведенная площадь S_R будет равняться:

$$S_R = S_1 + 0,73S_2 + 0,71S_3 + 0,67S_4 + 0,81S_5.$$

Модуль находим:

$$E_S = f_{R1} f_{R2} S_R, \text{ M}^2,$$

где f_{R1} — корректирующий фактор, учитывающий влияние отношения осадки к высоте борта:

$$f_{R1} = 1,15 \left(\frac{d_X}{D_X} \right)^{0,25};$$

f_{R2} — корректирующий фактор, учитывающий влияние объемного водоизмещения одного корпуса катамарана:

$$f_{R2} = 0,7 + 2,37(1,26 + L_{WL}) \nabla_1 / L_{WL}^3.$$

Массу надстройки можно рассчитать таким способом:

$$W_{Sup} = g_{Sup} V_{Sup}, \text{ T},$$

где g_{Sup} — измеритель массы надстройки катамарана; V_{Sup} — объем надстройки.

Массу оборудования получаем по формуле:

$$W_{Out} = 0,03L_{OA}B.$$

Масса энергетической установки, включающая в себя массу главных и вспомогательных двигателей, движителей и редукторов, определяется:

$$W_M = W_P + W_{Rm},$$

где W_P — масса пропульсивного комплекса: $W_P = W_D + W_{GB} + W_{WJ}$; $W_D = 6,82 \left(\frac{P_I}{RPM} \right)^{0,85}$ — масса главных двигателей, $W_{GB} = 0,00348P_I^{0,75}$ — масса редукторов; $W_{WJ} = 0,00018P_I^{1,18}$ — масса водометов; $W_{Rm} = 0,55W_P$ — масса других механизмов и оборудования энергетической установки; RPM — число оборотов главного двигателя.

Запас водоизмещения, как правило, задается в процентах от полного водоизмещения судна Δ :

$$W_{SM} = 0,025\Delta, \text{ т}.$$

Оценка стоимости постройки судна на начальном этапе проектирования выполняется по соотношениям [13]:

$$C_{TA} = C_{est} + C_{eq} + C_{ma},$$

где C_{est} — стоимость материалов и работ по изготовлению корпуса; C_{eq} — стоимость оборудования; C_{ma} — стоимость механизмов.

Значение C_{est} находим следующим образом:

$$C_{est} = [1,1W_{Hull}M] + [W_{Hull}L_{Work}H],$$

где M — стоимость одной тонны материала корпуса; H — стоимость одного нормо-часа; L_{Work} — трудоемкость изготовления корпуса, нормо-часов.

Стоимость механизмов равна:

$$C_{ma} = 1,4(C_D + C_{GB} + C_{WJ}),$$

где C_D — стоимость главных двигателей; C_{GB} — стоимость редукторов; C_{WJ} — стоимость водометов или винтов.

To calculate the cost of equipment, the following formula is used:

$$C_{eq} = \sum_{j=1}^K c_j W_j,$$

where W_j is the weight of the j -th load item, c_j is the unitary cost of the j -th load item material, c.u./t; K is the number of load items.

To assess the WFSV cost efficiency indicators, the author developed an original technique, which was based on the statistical modeling framework and the theory of probability.

The technique involves the use of the map of the wind farm for which the optimal characteristics of service vessels need to be determined. The familiar characteristics include the number of wind turbines in the park, the distance from the park to the facility of the service vessels location, the distance between the wind turbines and the scheme of their placement.

It is expected that the vessels can make voyages in the daytime at the waves height and the wind speed not exceeding the maximum permissible value. Attendance of the operating personnel takes place in the event of emergency or some wind turbine failure. The list of possible failures, the time required for fixing them, and the number of technicians required for the repair are set on the basis of studying the statistical data (see Table 1). It is anticipated that the possibility of the turbines breakdown or malfunction is the same for the entire wind farm.

The position of each wind farm turbine is set using the corresponding coordinates. Further on, the computer modeling of the wind farm functioning is performed, which accounts for possible emergency events and failures of the turbines. The flow of emergency events (failure rate) for the wind farm life cycle is presented in the form of the Weibull law [6]:

$$h(t) = \rho \beta t^{\beta-1},$$

where ρ is the scale coefficient; β is the form coefficient.

The modeling of emergency or repair takes place according to the following algorithm. At any given time, the sensor generates a pseudorandom number R , which is set by the uniform distribution law in the range from 0 to 1. The event of the turbine failure is considered to have occurred when

$$R > [1 - h(t)] \frac{\delta t}{8760}.$$

If it happens in working time and weather conditions allow for repair, the vessel motion and the turbine repair are modeled. With the use of the map, the distance of the vessel transfer $Dist_i$ is determined. Then the following values are calculated:

- the additional resistance in a seaway taking into account the current weather conditions R_{AW_i} ;
- the vessel speed loss in a seaway;
- the time of the personnel transfer $T_{S_i} = Dist_i / V_{a_i}$;
- the varying constituents of the operational expense of the vessel C_{S_i} ;
- the coefficient of operational service of the vessel.

Для расчета стоимости оборудования используется следующее выражение:

$$C_{eq} = \sum_{j=1}^K c_j W_j,$$

где W_j — масса j -й статьи нагрузки, т; c_j — удельная стоимость материала j -й статьи нагрузки, у.е./т; K — число статей нагрузки.

Для оценки показателей экономической эффективности WFSV автором разработана оригинальная методика, в основу которой положен аппарат статистического моделирования и теории вероятностей.

Методика предполагает использование карты ветропарка, для которого требуется определить оптимальные характеристики обслуживающих судов. Известными характеристиками являются: количество ВЭУ в парке, расстояние парка до базы базирования обслуживающих судов, расстояние между ВЭУ и схема их расположения.

Предполагается, что суда могут выполнять рейсы в светлое время суток при высоте волн и скорости ветра, не превышающих заданные максимально допустимые значения. Выезд обслуживающего персонала выполняется при возникновении аварии или какой-либо неисправности ветровой турбины. Перечень возможных неисправностей, время, необходимое для их устранения, количество техников, требуемое для ремонта, задаются на основе изучения статистических данных (см. табл. 1). Предусматривается, что вероятность поломки/неисправности турбин одинаковая для всего ВЭП.

Положение каждой турбины ВЭП задается соответствующими координатами. Далее выполняется компьютерное моделирование функционирования ВЭП, в процессе которого учитываются возможные аварийные события и отказы турбин. Поток аварийных событий (интенсивность отказов) за жизненный цикл ВЭП представляется в виде закона Вейбулла [6]:

$$h(t) = \rho \beta t^{\beta-1},$$

где ρ — коэффициент масштаба; β — коэффициент формы.

Моделирование аварийной ситуации или ремонта происходит по следующему алгоритму. В любой момент времени с помощью датчика генерируется псевдослучайное число R , заданное равномерным законом распределения в интервале от 0 до 1. Событие отказа турбины считается произошедшим при

$$R > [1 - h(t)] \frac{\delta t}{8760}.$$

Если время рабочее и погодные условия позволяют выполнить ремонт, то моделируется движение судна и ремонтные работы турбины. С помощью карты определяется расстояние перехода судна $Dist_i$. Далее находится:

- дополнительное сопротивление на волнении с учетом текущих погодных условий R_{AW_i} ;
- потеря скорости судна на волнении;
- время доставки персонала $T_{S_i} = Dist_i / V_{a_i}$;

When calculating the time of the personnel transfer the current weather conditions in the area of the wind farm are taken into account and the vessel speed in a seaway is determined:

$$V_{ai} = V_0 - \delta V_i,$$

where V_0 is the vessel speed in still water; δV_i is the coefficient taking into account the speed losses in a seaway:

$$\frac{\delta V_i}{V_0} = \sqrt{1 + \frac{R_{AW_i}}{R_{T_i}}},$$

where R_{AW_i} is the additional wave resistance for the i th time step; R_{T_i} is the total resistance of the vessel in still water.

If the emergency happens in non-working time or at unsuitable weather conditions, the downtime is modeled, and the wind farm losses resulting from the broken turbine downtime are determined with the help of the formula (1).

The suggested technique has been implemented in the form of the software complex enabling the visualization of the entire process of the WFSV operation during a specified period.

CONCLUSIONS. The developed technique allows the selection of the optimal design characteristics for the offshore wind farm service vessels using the integrated criterion which takes into account the actual operating conditions and minimizes the maintenance costs and economic losses due to the turbine failures and delays in their repair.

The suggested technique of the selection of the optimal WFSV characteristics is applicable to the conceptual design of catamarans. At the same time, it can easily be used for other WFSV types by modifying the mathematical model of the vessel.

The obtained results can also be implemented in design organizations for the determination of the WFSV principle dimensions and the selection of the optimal wind farm maintenance strategy.

– переменные составляющие эксплуатационных расходов судна C_S ;

– коэффициент оперативного использования судна.

При расчете времени доставки персонала учитываются текущие погодные условия в районе ВЭП и определяется скорость судна на волнении:

$$V_{ai} = V_0 - \delta V_i,$$

где V_0 — скорость судна на тихой воде; δV_i — коэффициент, учитывающий потери скорости на волнении:

$$\frac{\delta V_i}{V_0} = \sqrt{1 + \frac{R_{AW_i}}{R_{T_i}}},$$

где R_{AW_i} — дополнительное волновое сопротивление для i -го шага времени; R_{T_i} — полное сопротивление судна на тихой воде.

Если время нерабочее или неподходящие погодные условия, то моделируется простой и по формуле (1) определяются потери ВЭП от простоя половинной турбины.

Предложенная методика была реализована в виде программного комплекса, дающего возможность визуализировать весь процесс функционирования WFSV за указанный период.

ВЫВОДЫ. Разработанная методика позволяет выбирать оптимальные проектные характеристики судов для доставки персонала на шельфовые ВЭП по комплексному критерию, учитывающему реальные условия эксплуатации и минимизирующему расходы на обслуживание, экономические потери в результате отказов турбин и несвоевременного ремонта.

Предложенная методика выбора оптимальных характеристик WFSV применима для концептуального проектирования катамаранов. В то же время она легко может быть использована для других типов WFSV путем внесения изменений в математическую модель судна.

Полученные результаты также можно использовать в проектных организациях для определения главных размерений WFSV и выбора оптимальной стратегии обслуживания ВЭП.

Список литературы

- [1] **Бойко, А. П.** Применение генетического алгоритма для выбора оптимальных характеристик пассажирских судов с малой площадью ватерлинии [Текст] / А. П. Бойко, А. В. Бондаренко // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали I міжнародної науково-технічної конференції. — м. Миколаїв, 15–17 вересня 2010 р. — Миколаїв : НУК, 2010. — С. 99–102.
- [2] **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. — М. : Горячая линия — Телеком, 2006. — 452 с.
- [3] **Рябинин, И. А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин. — 2-е изд. — СПб. : Изд. Санкт Петербургского университета, 2007. — 276 с.
- [4] **Советов, Б. Я.** Моделирование систем [Текст] / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — 6-е изд., стер. — М. : Высш. школа, 2009. — 342 с.
- [5] **Chan, V.** Theory and Applications of Monte Carlo Simulations [Text] / V. Chan. — InTech, 2013. — 284 p.
- [6] **Dalgic, Y.** Optimum CTV fleet selection for offshore wind farm O&M activities [Text] / Y. Dalgic, I. Dinwoodie, I. Lazakis, D. McMillan, M. Revie // Safety and Reliability: Methodology and Applications. — London : CRC Press, 2014. — P. 1177–1185.

[7] Global Wind Report: Annual Market Update 2014 [Electronic resource]. — Mode of access: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/03/GWEC_Global_Wind_2014_Report_LR.pdf.

[8] **Grubisic, I.** Reliability of Weight Prediction in the Small Craft Concept Design [Text] / I. Grubisic // Proceedings of the 6th international conference on high-performance marine vehicles “HIPER 2008” (18–19 September 2008). — Naples, 2008. — P. 215–226.

[9] **Jupp, M.** XSS — A Next Generation Windfarm Support Vessel [Text] / M. Jupp, R. Sime, E. Dudson // International Conference «Design & Operation of Wind Farm Support Vessels». — London, 29–30 January 2014. — London: The Royal Institution of Naval Architects, 2014. — 8 p.

[10] **Kahrobaee, S.** Risk-Based Failure Mode and Effect Analysis for Wind Turbines (RB-FMEA) [Electronic resource] / S. Kahrobaee, S. Asgarpoor. — Mode of access OR Available from: <http://digitalcommons.unl.edu/electricalengineeringfacpub/172>.

[11] **Law, A. M.** Simulation modeling and analysis: 5th edition [Text] / A.M. Law. — New York: McGraw-Hill, 2015. — 804 p.

[12] **Molland, A. F.** Preliminary estimates of the dimensions, powering and seakeeping characteristics of fast ferries [Text] / A. F. Molland, T. Karayannis, D.J. Taunton, Y. Sarac-Williams // International marine design: International marine design conference, IMDC 2003. — P. 47–60.

[13] **Moraes, H. B.** Multiple criteria optimization applied to high speed catamaran preliminary design [Text] / H.B. Moraes, J.M. Vasconcellos, P.M. Almeida // Ocean Engineering. — 2007. — 34. — P. 133–147.

[14] **Oosterveld, M.** Further Computer Analyzed Data of the Wageningen B-Screw Series [Text] / M. Oosterveld, P. Oosamen // International Shipping Progress. — 1975. — Vol. 22. — No. 251, July. — P. 3–14.

[15] **Stewart, W. J.** Probability, Markov Chains, Queues, and Simulation: The Mathematical Basis of Performance Modeling [Text] / W. J. Stewart. — Princeton: Princeton University Press, 2009. — 776 p.

[16] **Van Terwisga, J. C.** A parametric propulsion prediction method for waterjet driven craft [Text] / J. C. Van Terwisga // Proceedings of the 4th International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '97), Sydney, Australia, July 21–23, 1997. — Sydney: Baird Publications. — P. 661–668.

[17] **Zips, J. M.** Numerical Resistance Prediction based on the Results of the VWS Hard Chine Catamaran Hull Series ‘89’ [Text] / J. M. Zips // Proceedings of the Third International Conference on Fast Sea Transportation (Fast '95), September 25–27: Lubeck — Travemunde, Germany, 1995. — P. 67–74.

© А. В. Бондаренко

Статью рекомендует в печать
д-р техн. наук, проф. В. А. Некрасов

КНИЖНАЯ ПОЛКА



11.1. Характеристичні поліноми моделі Бесселя-Томсона

Степінь полінома	Вид полінома	τ_r
2	$p^2 + 3.41q_0 p + q_0^2$	2.8
3	$p^3 + 3.73q_0 p^2 + 2.13q_0^2 p + q_0^3$	3.6
4	$p^4 + 2.1q_0 p^3 + 3.4q_0^2 p^2 + 2.7q_0^3 p + q_0^4$	4.7
5	$p^5 + 2.8q_0 p^4 + 5.6q_0^2 p^3 + 3.5q_0^3 p^2 + 3.4q_0^4 p + q_0^5$	7.8
6	$p^6 + 3.23q_0 p^5 + 6.6q_0^2 p^4 + 8.6q_0^3 p^3 + 7.45q_0^4 p^2 + 3.95q_0^5 p + q_0^6$	8.4

11.2. Характеристичні поліноми Бесселя-Томсона

Такі поліноми використовуються для усунення фізичних викривлень сигналу, які будуть тим більші, чим більше фізична частотна характеристика системи відрізняється від лінійної.

Фільтри Бесселя-Томсона мають фазочастотну характеристику, близьку до лінійної.

Перехідні характеристики та характеристичні поліноми моделі Бесселя-Томсона наведені відповідно на рис. 11.2 та в табл. 11.2.

Рис. 11.1. Перехідні характеристики моделі, що оптимізована за критерієм $F = \int_0^T |f(t) - h(t)| dt$

Рис. 11.2. Перехідні характеристики моделі Бесселя-Томсона

Стандартні характеристичні поліноми зв'язаних систем 75

Таблиця 11.2. Характеристичні поліноми моделі Бесселя-Томсона

Степінь полінома	Вид полінома	τ_r
2	$p^2 + 2.5q_0 p + 1.62q_0^2$	2.8
3	$p^3 + 3.42q_0 p^2 + 4.87q_0^2 p + 2.77q_0^3$	3.6
4	$p^4 + 4.73q_0 p^3 + 10.1q_0^2 p^2 + 11.1q_0^3 p + 5.26q_0^4$	4.7
5	$p^5 + 6.18q_0 p^4 + 17.8q_0^2 p^3 + 29.6q_0^3 p^2 + 27.2q_0^4 p + 11.3q_0^5$	7.8
6	$p^6 + 7.77q_0 p^5 + 28.7q_0^2 p^4 + 63.8q_0^3 p^3 + 88.3q_0^4 p^2 + 72.0q_0^5 p + 26.6q_0^6$	8.4

11.3. Характеристичні поліноми Баттерворта

Дані поліноми використовуються для усунення амплітудних викривлень, за яких амплітудно-частотна характеристика системи є плоскою в робочому діапазоні частот.

Перехідні характеристики та характеристичні поліноми Баттерворта наведені відповідно на рис. 11.3 та в табл. 11.3.

Рис. 11.3. Перехідні характеристики моделі Баттерворта

Таблиця 11.3. Характеристичні поліноми моделі Баттерворта

Степінь полінома	Вид полінома	τ_r
2	$p^2 + 1.41q_0 p + q_0^2$	2.8
3	$p^3 + 2.6p^2 + 2q_0^2 p + q_0^3$	5.9
4	$p^4 + 2.61q_0 p^3 + 3.41q_0^2 p^2 + 2.61q_0^3 p + q_0^4$	6.9
5	$p^5 + 3.24q_0 p^4 + 5.24q_0^2 p^3 + 5.24q_0^3 p^2 + 3.24q_0^4 p + q_0^5$	7.8
6	$p^6 + 3.86q_0 p^5 + 7.48q_0^2 p^4 + 9.14q_0^3 p^3 + 7.48q_0^4 p^2 + 3.86q_0^5 p + q_0^6$	8.0

Пособие посвящено теории оптимального управления детерминированных и стохастических систем и ее применению. Большое внимание уделено классическим вариационным методам Эйлера-Лагранжа и Гамильтона-Якоби, неклассическим вариационным методам — динамическому программированию Р. Беллмана, принципу максимума Л.С. Понтрягина, а также оптимальной фильтрации Винера и фильтрам Калмана-Бьюси. В пособии подробно рассматривается метод пространства состояний, основанный на более абстрактной теории систем и методах анализа и синтеза.