

УДК 621.311.26

EDN RNQHFY

НАДЕЖНОСТЬ МОРСКИХ УСТАНОВОК ПО ПРЕОБРАЗОВАНИЮ ЭНЕРГИИ В РАМКАХ КОМБИНИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Д.А. УстиновORCID: **0000-0002-1302-0743** e-mail: **ustinov_da@pers.spmi.ru**

Санкт-Петербургский горный университет

*Санкт-Петербург, Россия***Е.Р. Шафхатов**ORCID: **0009-0009-5828-5348** e-mail: **ershat11@mail.ru**

Санкт-Петербургский горный университет

Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается один из аспектов интеграции морских преобразователей энергии, необходимой для сбалансированного развития морских энергетических технологий: синергетический эффект от использования ветрогенераторов и волновых преобразователей при их комбинировании с учетом теневого эффекта. Оценка надежности комбинированной системы с морскими преобразователями энергии необходима для выявления возможных преимуществ на раннем этапе проектирования и при дальнейшем эксплуатации. Показано, как с помощью различных топологий расположения ветровых турбин и преобразователей волн относительно друг друга в одной системе возможно повысить надежность работы всего комплекса.

Целью исследования является изучение синергетических эффектов от интеграции в одну систему морских преобразователей энергии, что позволит расширить зону применения этих ресурсов и оптимизировать использование морской среды.

Ключевые слова: волновые преобразователь энергии, комбинированная система, морская ветровая установка, показатели надежности, теневой эффект.

Для цитирования: Устинов Д.А., Шафхатов Е.Р. Надежность морских установок по преобразованию энергии в рамках комбинированного комплекса // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 1. С. 123-134. EDN RNQHFY

RELIABILITY OF OFFSHORE ENERGY CONVERSION INSTALLATIONS WITHIN COMBINED COMPLEX

D.A. Ustinov

ORCID: 0000-0002-1302-0743 e-mail: ustinov_da@pers.spmi.ru
Saint-Petersburg Mining University
Saint Petersburg, Russia

E.R. Shafhatov

ORCID: 0009-0009-5828-5348 e-mail: ershat11@mail.ru
Saint-Petersburg Mining University
Saint Petersburg, Russia

Abstract. An important factor for the balanced development of marine energy technologies is the optimization of resource exploitation, and a common task for both industries is to reduce costs, which implies the possibility of integration of marine energy converters. This paper considers a feature of this integration: the synergistic effect of wind generators and wave converters when combined with the shadow effect. Reliability assessment of a combined system with offshore energy converters is necessary to identify possible advantages at an early design stage and in their future use. This paper shows how different topologies of wind turbines and wave converters in relation to each other in one system can be used to improve the reliability of the whole system.

The aim of the study is to investigate the synergistic effects of integrating marine energy converters into one system, which will expand the area of application of these resources and optimize the use of the marine environment.

Keywords: combined system, reliability indices, shadow effect, offshore wind turbine, wave energy converter.

For citation: D.A. Ustinov and E.R. Shafhatov, "Reliability of offshore energy conversion installations within combined complex", *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 123-134, 2024. EDN RNQHFY

I. Введение

В связи с растущим спросом на электроэнергию и политикой компаний, ориентированной на сокращение выбросов CO₂, развитие морских альтернативных источников выходит на новый уровень [1]. За 2019 г. было введено новых 6,1 ГВт новых мощностей ветрогенераторов, установленных в море. Лидером здесь стал Китай, установив ветрогенераторы мощностью 2,4 ГВт, затем следует Великобритания (1,8 ГВт) и Германия (1,1 ГВт).

С 2013 г. рынок морских ветрогенераторов в среднем увеличивается на 24 %, в результате чего общий объем установок достигает 29,1 ГВт (5 % от общей ветроэнергетической мощности в мире на конец 2019 г. (рис. 1)).

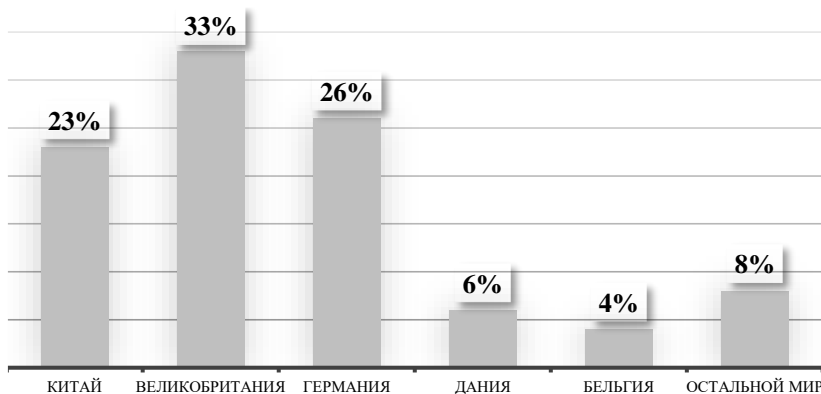


Рис. 1. График новых установок морских ветрогенераторов по странам [2]

Fig. 1. Graph of new offshore wind turbine by country [2]

Для решения нынешнего энергетического кризиса и проблем загрязнения окружающей среды энергия волн может играть важную роль в удовлетворении спроса на электроэнергию [3].

Побережья континентов, обращенные к западу, как правило, обладают лучшими энергетическими ресурсами волн (рис. 2). Существует также сильная сезонная изменчивость; ресурс энергии волн зимой, как правило, намного больше, чем летом. Однако, как и в случае с ветром, волны имеют непостоянный характер действия, и поэтому выходная мощность может значительно колебаться. Эта изменчивость может препятствовать подаче энергии потребителю из-за возникающей нестабильности в энергосистеме.

Одним из решений снижения влияния изменчивости выходной мощности является создание комбинированной системы, состоящей из морских ветрогенераторов и волновых преобразователей, что подразумевает их сочетание на одном и том же пространстве: создание единой энергетической системы.

II. Комбинированные системы и эффект тени

Под комбинированной системой подразумевается объединение ветровых и волновых преобразователей в единую систему, заключенную в пределах одной морской зоны, с общей инфраструктурой электрических сетей, логистикой сервиса и эксплуатации, а также системой оснований и фундаментов конструкций.

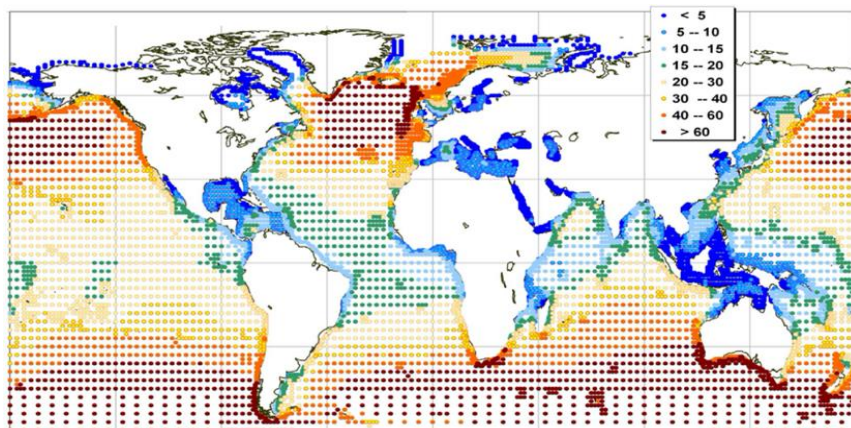


Рис. 2. Среднегодовой мировой ресурс мощности волн в кВт на метр длины гребня волны [4]

Fig. 2. Average annual world resource of wave power in kW per meter of wave crest length [4]

В зависимости от расположения в морской акватории преобразователей они делятся на независимые и комбинированные (рис. 3).

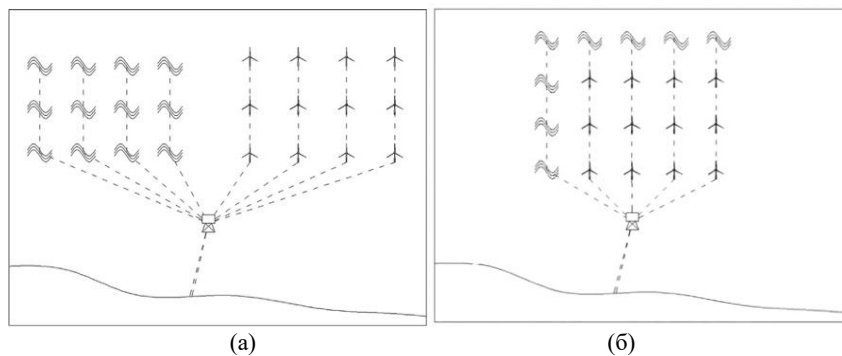


Рис. 3. Схема: совместно расположенного независимого массива (а); совмещенных комбинированных систем – периферийно распределенный массив (б)

Fig. 3. Scheme of jointly located independent array (a); combined systems – peripherally distributed array (b)

В [5] были подробно рассмотрены различные конфигурации размещения волновых и ветровых установок, которые используют одну морскую

зону. Комбинированные морские установки имеют ряд положительных эффектов, комбинированное использование волн и морского ветра увеличивает генерацию энергии на единицу площади, способствуя тем самым более устойчивому использованию возобновляемых источников энергии [6-8].

Установлено, что при конфигурации моделей (рис. 3, б) формируется барьер для набегающих волн, создающий «эффект тени» [9, 10]. Это эффект использования волновых установок для защиты внутренней части массива, состоящей из морских ветроустановок и уменьшения высоты волны на ее внутренней части, который не только создает погодные окна для ремонтных бригад, но также уменьшает нагрузку на конструкцию и якорную систему, используемую для крепления установок [11].

Для анализа используется показатель эффекта тени [10]. Показатель значительного снижения высоты волны вдоль горизонтального ряда j ветроустановок (*significant wave height reduction along the wind turbine column – HRC_j*) оценивает влияние теневого эффекта на ветрогенераторы по мере увеличения расстояния от них по отношению к волновым преобразователям [10]. Он рассчитывается по формуле:

$$HRC_j = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{H_{Si} - H_{SWECi}}{H_{Si}}, \quad (1)$$

где индекс i обозначает конкретную турбину ряда j ветропарка; n – общее количество турбин в соответствующем горизонтальном ряду j ; H_{Si} и H_{SWECi} – значительная высота падающей волны на i -й турбине в базовом сценарии (без волновых преобразователей) и с размещенными волновыми преобразователями, соответственно.

При изменении расстояния между волновыми преобразователями наблюдается рассеивание волн внутри комбинированной системы, что создает более благоприятные условия для работы ветрогенераторов и погодные окна для их обслуживания. Было доказано, что уменьшение высоты волн внутри комбинированной системы может достигать 27,42 % [9].

Оценку эффективности комбинированных установок выполним с помощью показателей, характеризующих надежность: вероятности безотказной работы, коэффициента готовности, среднего времени технического обслуживания с учетом эффекта тени.

III. Надежность комбинированного комплекса

Развитие анализа надежности для морских систем является сложной и важной задачей, так как последствия отказов потребуют дорогостоящих ремонтов в условиях морской среды. Поэтому прогноз интенсивности отказов и работоспособности установок следует сделать максимально точным, с возможностью дальнейших усовершенствований [12].

Для моделирования надежности и безопасности сложных структур ввиду сильной взаимосвязанности параметров необходимо использовать программные комплексы, включающие в себя всю совокупность методов как статических, так и динамических моделей. При этом должны быть реализованы комплексные алгоритмы прогнозирования безотказности, ремонтпригодности, анализа видов и последствий отказов [13, 14]. В работе использован программный комплекс ПК «Арбитр», в котором в качестве исходной структурной схемы используются схемы функциональной целостности (СФЦ). СФЦ – это графический способ представления исследуемых свойств системных объектов для построения структурных схем для расчета показателей надежности [15].

На рис. 4 представлена общая структура комбинированной системы, которая может быть использована для оценки морских возобновляемых энергетических систем с целью выявления ограничений и возможных областей улучшения для конкретных устройств или объектов. Она включает в себя основные элементы волнового преобразователя (элементы 1...7) и ветроустановки (элементы 8...14), подключенных к одной системе шин (15). Интенсивности отказов элементов волновых преобразователей и ветрогенераторов приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Интенсивности отказов элементов
волнового преобразователя и ветрогенератора [16, 17]

Table 1.
Failure rates of wave converter and wind generator elements [16, 17]

Волновой преобразователь		Ветрогенератор	
Компоненты	λ_c [1/год]	Компоненты	λ_c [1/год]
Якорная система	0,185	Якорная система	0,185
Конструкция	0,001	Конструкция	0,089
Волновой преобразователь	2,4	Ветрогенератор	0,4
Шина электрическая	0,01	Шина электрическая	0,01
Выключатель	0,26	Выключатель	0,26
Шлангокабель	0,04	Шлангокабель	0,04
Преобразователь DC/AC	0,08	Преобразователь AC/AC	0,08

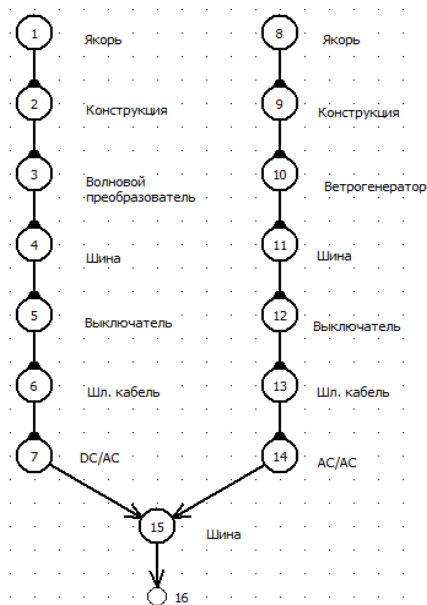


Рис. 4. Функциональная схема комбинированных морских установок (составлена в программе ПК «Арбитр»)

Fig. 4. Functional diagram of combined offshore installations (compiled in the program PC «Arbitr»)

Выполним оценку показателей надежности электроснабжения объекта 16 (рис. 4) при комбинированной работе двух установок: ветровой и волновой. При этом учитывается, что объект 16 находится в рабочем состоянии, если он получает питание либо от волновой установки, либо от ветроустановки, либо от одновременно работающих волнового преобразователя и ветрогенератора.

На рис. 5 и 6 показаны диаграммы положительных вкладов ветро-волновой установки без учета теневого эффекта и с учетом теневого эффекта. Вклад каждого элемента в возможное увеличение вероятности безотказной работы системы – ΔP_i . Он равен изменению вероятности безотказной работы системы при изменении вероятности безотказной работы элемента от текущего значения до 1.

Коэффициент готовности ветровой установки $K_T = 0,9995$, среднее время восстановления $T_B = 38,9$ ч, наработка до отказа 10,03 лет, вероятность безотказной работы $P = 0,905$.



Рис 5. Схема положительных вкладов морских установок без учета теневого эффекта

Fig. 5. Scheme of positive contributions of offshore installations without shadow effect

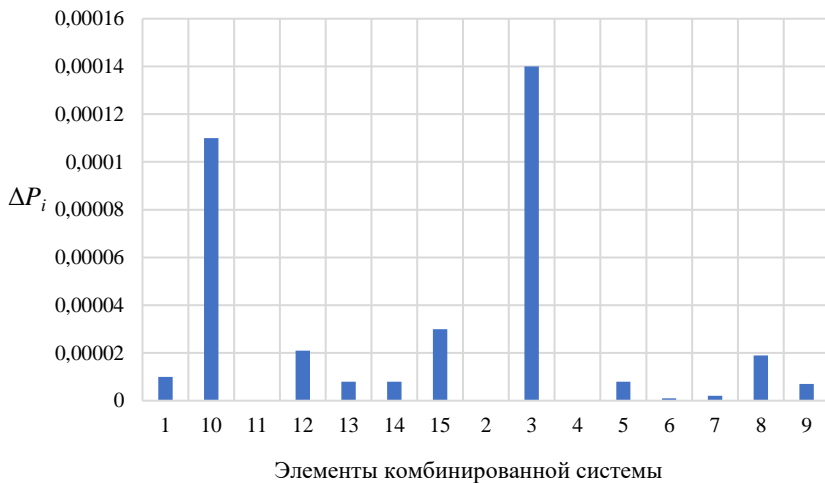


Рис. 6. Схема положительный вкладов морских установок с учетом теневого эффекта

Fig. 6. Scheme of positive contributions of offshore installation taking into account the shadow effect

Теневой эффект учтем путем снижения волновой нагрузки на якорную систему, а также уменьшения времени обслуживания за счет увеличения количества дней в году, в течение которых будет возможен допуск к ветрогенераторам из-за допустимой высоты волн.

Коэффициент готовности ветровой установки $K_T = 0,9998$, среднее время восстановления $T_B = 25,05$ ч, наработка до отказа 14,48 лет, вероятность безотказной работы $P = 0,933$.

Из представленных результатов видно, что эффект тени от применения волновых установок приводит к улучшению значения коэффициента готовности, среднего времени восстановления, наработки на отказ и вероятности безотказной работы: коэффициент готовности повысился на 0,3 %, среднее время восстановления снизилось на 55 %, наработка до отказа увеличилась на 44 %, вероятность безотказной работы увеличилась на 3 %.

IV. Выводы и перспективы

В данной работе представлены показатели надежности при совместном размещении волновых и морских ветряных электростанций с учетом эффекта тени, создаваемого волновыми станциями при их совместном размещении с морскими ветровыми установками.

Представлена методика определения надежности комбинированной системы морских установок, учитывающая такие показатели как, значения коэффициента готовности, среднего времени восстановления, наработки на отказ и вероятности безотказной работы. Результаты получены в программе ПК-Арбитр.

© Устинов Д.А., 2024

© Шафхатов Е.Р., 2024

Поступила в редакцию 11.05.2023

Принята к публикации 14.08.2023

Received 11.05.2023

Accepted 14.08.2023

Библиографический список

- [1] Zhukovskiy Y.L., Lavrik A.Y., Buldysko A.D. Energy demand side management in stand-alone power supply system with renewable energy source // International conference on innovations, physical studies and digitalization in mining engineering 2020, IPDME 2020, Apr. 23-24, 2020, Saint Petersburg, Russia: IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 1753. P. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012059
- [2] Global Wind Atlas. [Электронный ресурс]. URL: <https://globalwindatlas.info> (дата обращения 15.02.2023).
- [3] GWEC. Global Wind Energy Council. Global Offshore Wind Report 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2020/> (дата обращения: 15.02.2023).

- [4] Mork G., Barstow S., Pontes M.T., Kabuth A. Assessing the global wave energy potential // 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Jun., 2010, Shanghai, China: // Proceedings of OMAE2010, 2010. P. 447-454. DOI: 10.1115/OMAE2010-20473
- [5] Pérez-Collazo C., Greaves D., Iglesias G. A review of combined wave and offshore wind energy // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. № 42. P. 141-153. DOI: 10.1016/j.rser.2014.09.032
- [6] Casale C., Serri L., Stolk N., Yildiz I., Cantu M. Synergies, innovative designs and concepts for multipurpose use of conversion platforms, Tech. rep., Results of ORECCA Project-WP4, 2012.
- [7] Pérez C., Iglesias G. Integration of wave energy converters and offshore windmills // 4th International conference on ocean energy (ICOE), Oct., 2012, Dublin, Ireland.
- [8] Fernandez Chozas J., Kofoed J.P., Sørensen H.C. Predictability and variability of wave and wind: wave and wind forecasting and diversified energy systems in the Danish North Sea. Aalborg: Aalborg University, 2013. – 156 p.
- [9] Carballo R., Iglesias G. Wave farm impact based on realistic wave-WEC interaction // Energy. 2013. Vol. 51. P. 216-229. DOI: 10.1016/j.energy.2012.12.040
- [10] Perez-Collazo C., Astariz S., Abanades J., Greaves D., Iglesias G. Co-located wave and offshore wind farms: a preliminary case study of an hybrid array // International Conference in Coastal Engineering (ICCE), June, 2014, Seoul, South Korea. Vol. 34. DOI: 10.9753/icce.v34.structures.33
- [11] Абрамович Б.Н., Веприков А.А., Сычѐв Ю.А., Лях Д.А. Использование активных преобразователей электроэнергии в промышленных источниках постоянного тока для питания электролизеров // Цветные металлы. 2020. № 2. С. 95-100. DOI: 10.17580/tsm.2020.02.13
- [12] Sychev Y.A., Aladin M.E., Serikov V.A. Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2022. № 13 (3). P. 1625-1634. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634
- [13] Бельский А.А., Скамбин А.Н., Васильков О.С. Применение гибридных накопителей электроэнергии для выравнивания графика нагрузки предприятий // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. № 63 (3). С. 212-222. DOI: 10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222
- [14] Zhukovskiy Y., Stoianova A., Tsvetkov P., Buldysko A., Malkova Y., Koshenkova A. Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic // Resources. 2021. № 10 (12). DOI: 10.3390/resources10120124
- [15] О программном комплексе // ПК-Арбитр. [Электронный ресурс] URL: <https://szma.com/arbitr> (дата обращения 15.02.2023).
- [16] Thies P.R., Flinn J., Smith G.H. Reliability assessment and criticality analysis for wave energy converters // 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Jan., 2009, Uppsala, Sweden.
- [17] Carroll J. Reliability comparison of wind turbines with DFIG and PMG drive trains // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Jul. 26-30, 2015, Denver, CO, USA: IEEE, 2015. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286449

References

- [1] Y.L. Zhukovskiy, A.Y. Lavrik and A.D. Buldysko, “Energy demand side management in stand-alone power supply system with renewable energy source”, in proc. *International conference on innovations, physical studies and digitalization in mining engineering 2020, IPDME 2020*, Apr. 23-24, 2020, Saint Petersburg, Russia, vol. 1753, pp. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012059
- [2] Global Wind Atlas. [Online]. Available at: <https://globalwindatlas.info> [Accessed: Feb. 15, 2023].
- [3] GWEC. Global Wind Energy Council. Global Offshore Wind Report 2020. [Online]. Available at: <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2020/> [Accessed: Feb. 15, 2023].
- [4] G. Mork, S. Barstow, M.T. Pontes and A. Kabuth, “Assessing the global wave energy potential”, in proc. *29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Jun., 2010, Shanghai, China, pp. 447-454. DOI: 10.1115/OMAE2010-20473
- [5] C. Pérez-Collazo, D. Greaves and G. Iglesias, “A review of combined wave and offshore wind energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 141-153, Feb. 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.09.032
- [6] C. Casale, L. Serri, N. Stolk, I. Yildiz and M. Cantu. Synergies, innovative designs and concepts for multipurpose use of conversion platforms, Tech. rep., Results of ORECCA Project - WP4, 2012.
- [7] C. Pérez and G. Iglesias, “Integration of Wave Energy Converters and Offshore Windmills, in proc. *4th International conference on ocean energy (ICOE)*, Oct., 2012, Dublin, Ireland.
- [8] J. Fernandez Chozas, J.P. Kofoed and H.C. Sørensen, *Predictability and variability of wave and wind: wave and wind forecasting and diversified energy systems in the Danish North Sea*. Aalborg: Aalborg University, 2013.
- [9] R. Carballo and G. Iglesias, “Wave farm impact based on realistic wave-WEC interaction”, *Energy*, vol. 51, pp. 216-229, 2013. DOI: 10.1016/j.energy.2012.12.040
- [10] C. Perez-Collazo, S. Astariz, J. Abanades, D. Greaves and G. Iglesias, “Co-located wave and offshore wind farms: a preliminary case study of an hybrid array”, in proc. *International Conference in Coastal Engineering (ICCE)*, Jun., 2014, Seoul, South Korea, vol. 34. DOI: 10.9753/icce.v34.structures.33
- [11] B.N. Abramovich, A.A. Veprikov, Y.A. Sychev and D.A. Lyakh, “Use of active power transducers in industrial DC power systems supplying electrolysis cells”, *Non-ferrous metals*, vol. 2, pp. 95-100, 2020. DOI: 10.17580/tsm.2020.02.13
- [12] Y.A. Sychev, M.E. Aladin and V.A. Serikov, “Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply”, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 13, no. 3, pp. 1625-1634, Sep. 2022. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634
- [13] A.A. Belsky, A.N. Skamyin and O.S. Vasilkov, “The use of hybrid energy storage devices for balancing the electricity load profile of enterprises”, *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, vol. 63, no. 3, pp. 212-222, 2020. DOI: 10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222

- [14] Y. Zhukovskiy, A. Stoianova, P. Tsvetkov, A. Buldysko, Y. Malkova and A. Koshenkova, "Scenario modeling of sustainable development of energy supply in the Arctic", *Resources*, vol. 10, no. 12, 2021. DOI: 10.3390/resources10120124
- [15] О программном комплексе [About the software package]. [Online]. Available at: <https://szma.com/arbitr> [Accessed: Feb. 15, 2023] (in Russian).
- [16] P.R. Thies, J. Flinn and G.H. Smith, "Reliability assessment and criticality analysis for wave energy converters", in proc. *8th European Wave and Tidal Energy Conference*, Jan., 2009, Uppsala, Sweden.
- [17] J. Carroll, "Reliability comparison of wind turbines with DFIG and PMG drive trains", in proc. *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Jul. 26-30, 2015, Denver, CO, USA. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286449

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Устинов Денис Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Denis A. Ustinov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.

Шафхатов Ершат Рашитович, аспирант Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Ershat R. Shafhatov, postgraduate student of the Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.