



Energy-Efficient Technologies of Hybrid Ship Electrical Power Systems and Their Algorithmic Implementation

Artem Tsypa and Vitalii Budashko

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

December 23, 2024

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ГІБРИДНИХ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ АЛГОРИТМІЗАЦІЯ

А.В. Ципа, здобувач другого рівня вищої освіти,
В.В. Будашко, д.т.н., професор
Національний університет «Одеська морська академія»

Анотація: У статті розглянуто методи підвищення енергоефективності суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) за допомогою використання гібридних систем, а також їх алгоритмізацію. Основна увага зосереджена на підвищенні ефективності паливовикористання та зниженні викидів шкідливих речовин шляхом використання альтернативних джерел енергії, таких як фотоелектричні системи та акумуляторні батареї. Оцінюється економічна доцільність впровадження таких систем, включаючи період окупності та виклики, пов'язані з їх високою вартістю. Запропоновані алгоритми оптимізації роботи СЕЕС, що враховують різні умови експлуатації суден.

Ключові слова: алгоритмізація, гібридна суднова електроенергетична система, енергоефективність, дизельні генератори, фотоелектричні системи, акумуляторні батареї, екологічність, автоматизація, викиди CO₂.

ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES OF HYBRID SHIP ELECTRICAL POWER SYSTEMS AND THEIR ALGORITHMIC IMPLEMENTATION

A.Tsyra, second-level higher education student,
V. Budashko Dr. of Science, Associate Professor
National University "Odessa Maritime Academy"

Abstract: The article examines methods for improving the energy efficiency of ship electrical power systems (SEPS) through the use of hybrid systems and their algorithmic implementation. The main focus is on increasing fuel efficiency and reducing harmful emissions by utilizing alternative energy sources such as photovoltaic systems and battery storage. The economic feasibility of implementing such systems is evaluated, including the payback period and challenges related to their high cost. The proposed algorithms aim to optimize the operation of SEPS, considering various ship operating conditions.

Keywords: algorithmization, hybrid ship electrical power system, energy efficiency, diesel generators, photovoltaic systems, battery storage, environmental friendliness, automation, CO₂ emissions.

Енергоефективність та якість електричної енергії на суднах мають значний вплив на вартість перевезень та кінцеву ціну вантажу [1]. Енергоефективність, в першу чергу, пов'язана з ефективним використанням палива, що є фактором, який знижує експлуатаційні витрати і водночас зменшує викиди шкідливих речовин у повітря, сприяючи екологічній відповідальності судноплавної галузі [2]. Оскільки впровадження новітніх технологій ускладнює будь яку систему додаванням нових елементів, кількість яких впливає на рівень надійності, то є важливим знаходження найоптимальніших способів підвищення енергоефективності суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) із забезпеченням необхідного рівня надійності [3].

У [4] автори зосередились на аналітичних дослідженнях впливу структури гібридної СЕЕС на ефективність використання дизельного палива. Були розглянуті можливості використання фотоелектричних систем та акумуляторних батарей великої ємності для підвищення енергоефективності СЕЕС із оцінкою потенціалу економії палива та зменшення викидів шкідливих речовин. Один із викликів, з яким стикнулись автори, був пов'язаний з високою вартістю акумуляторних батарей (АКБ) великої ємності, наприклад, системи "Megarack" від компанії "Tesla", що ускладнило економічну ефективність проекту, оскільки період окупності системи може бути досить тривалим. Ще однією проблемою було

обмеження простору на судах для встановлення фотоелектричних панелей. Теоретично автори довели, що використання гібридної СЕЕС, яка поєднує основні дизельні генератори (ДГ) з валогенератором, акумуляторами та фотоелектричними системами, може підвищити ефективність паливовикористання та зменшити викиди шкідливих речовин. Вони продемонстрували, що ефективність можна покращити, використовуючи додаткові джерела живлення та оптимізуючи роботу системи. До практичних результатів дослідження можна віднести можливість зменшення використання дизельного палива на 100 тонн/рік, що в грошовому еквіваленті становить близько 90000 доларів США, із зниженням викидів CO₂, NO_x та SO₂, що є важливим відповідно до вимог конвенції MARPOL. З точки зору впровадження результатів наведених досліджень, можна констатувати, що впровадження гібридних СЕЕС у виробництво є можливим, але його ефективність залежить від економічної доцільності та можливостей судноплавних компаній здійснювати довгострокові інвестиції. Системи гібридного живлення потребують значних капіталовкладень, але окупність проєкту в межах 4-5 років може бути привабливою для підприємств.

Використання АКБ великої ємності для таких систем є дуже важливим, адже тільки таким чином можна вивести генераторні установки на роботу в номінальному режимі і досягти найоптимальнішого співвідношення при перетворенні енергії палива на електричну енергію. Але постає проблема вартості таких АКБ. Одним з можливих факторів, що може призвести до більш раціонального вкладення у АКБ це збільшення терміну їх роботи. Щоб максимізувати термін служби літій-іонних акумуляторів, рекомендується обмежити глибину розряду. Як правило, розряд літій-іонної батареї приблизно до 20-25% і підтримання рівня заряду між 25% і 85% значно подовжить термін її служби і корисна ємність складає 60% від повної ємності АКБ. Цей діапазон допомагає уникнути стресу, який виникає під час граничного рівня заряду або повного розряду. Наприклад, зміна заряду від 85% до 25% забезпечує кращий термін служби, ніж зарядка до 100% і розрядка до 50%. Насправді обмеження діапазону заряду до 75%-65% може забезпечити найдовший термін служби, але значно зменшує корисну ємність, тому такий спосіб використання не є раціональним [5]. Але при цьому, для СЕЕС потужністю 1 МВт, яка 8 годин живиться від сонячних панелей, а 16 годин від АКБ, ємність яких повинна бути не 16 МВт, які становитимуть лише 60% корисної ємності, а 27МВт і вартість такої АКБ на сьогодні складає 6,384,690 доларів США[6], у попередніх же розрахунках ціна зменшилась, так як такі системи стали більш популярізовані і ціна на виготовлення одиниці такої батареї зменшилась, тобто такими темпами, це стане ще вигіднішим рішенням, якщо використання таких систем набуде великих масштабів та попиту у судновій галузі. Відповідно до розрахунків у [4] разом з сонячними панелями вартуватиме 8,671,590 доларів США. Але така система спроможна економити відповідно до попередніх розрахунків 1 702 944\$ на рік, без урахування того, що для використання палива необхідно його підігрівати за допомогою парових установок, у яких так само спалюється паливо, а також повинні працювати системи очищення палива та його подачі, системи подачі мастила і повітря, та інші, які у неробочому стані також зменшують навантаження на СЕЕС. За прогнозами така система окупиться вже за 5,1 рік, замість 4,3 років, але термін дієпридатності батарей буде подовжено. Також слід враховувати, що навіть після довгострокової експлуатації АКБ, вона залишається у власника і навіть після переходу її в несправний стан може бути відновлена та використовуватися на іншому судні, або її можна продати, та повернути частину коштів, які в подальшому витрати на нову АКБ.

Ще одним зі способів підвищення ефективності використання енергії, є шлях зменшення втрат у СЕЕС, таким способом є використання високовольтних систем на судах, який має ряд переваг, зокрема значно нижчі втрати при передачі електроенергії порівняно з низьковольтними системами. Основна причина зменшення втрат полягає в тому, що при збільшенні напруги знижується сила струму, що проходить через провідники, а відповідно й втрати енергії через тепловиділення в проводах. Наприклад, в системах з напругою 6.6 кВ втрати при передачі значно менші, ніж в низьковольтних мережах на 440 В. Окрім цього, високовольтні системи дозволяють використовувати менш габаритні та легші компоненти, оскільки при вищій напрузі менші струми вимагають менших провідників. Це призводить до економії місця та зменшення загальної ваги систем на судні. Наприклад, двигун для роботи з 6.6 кВ буде значно меншим за аналогічний на 440В, а втрати при передачі електроенергії, для СЕЕС потужністю 1 МВт матимуть наступний вигляд:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \mu} = \frac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 440 \cdot 0.8} = 1640 \text{ A} \quad (1)$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \mu} = \frac{1 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6600 \cdot 0.8} = 109 \text{ A} \quad (2)$$

$$\text{Втрати потужності} = I^2 \cdot R \quad (3)$$

де U – напруга ДГ / СЕЕС; P – потужність СЕЕС; $\cos \mu$ - коефіцієнт потужності; I - сила струму, що виробляється у СЕЕС та проходить по провіднику; R - опір провідника.

Але високовольтні системи мають свої переваги та недоліки, які наведено у статті [7], і більш детально розглянуто особливості високовольтних систем у монографії [8].

Відповідно до усіх перерахованих аспектів, було утворено наступний найоптимальніший алгоритм для роботи найефективнішої для сьогодення варіації СЕЕС.

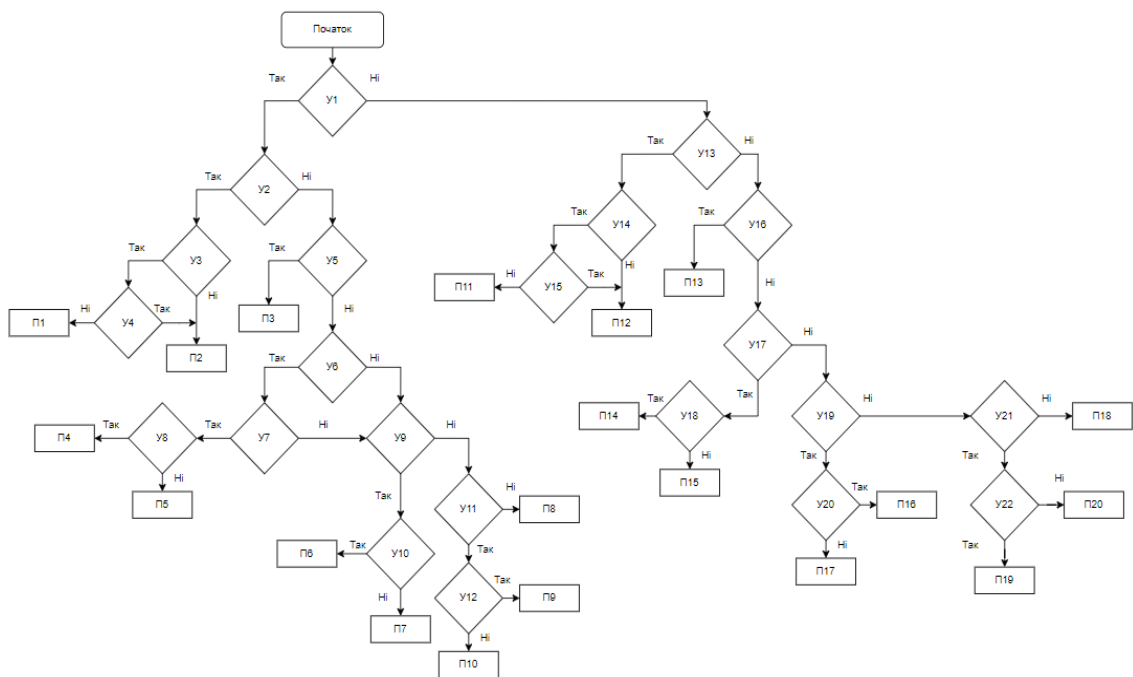


Рисунок 1 - Алгоритм роботи гібридної суднової ЕЕС.

Умові позначення на рис. 1 (У - умова; П - Процес):

У1 – Судно знаходиться в порту?
У2; У13 – Суднове навантаження менше ніж потужність, що можуть забезпечити сонячні панелі?
У3; У8; У10; У12; У14; У18; У20; У22 – Залишкової енергії достатньо, щоб заряджати АКБ?
У4; У15 – АКБ заряджені повністю?
У5; У16 – Суднове навантаження менше ніж потужність, що можуть забезпечити АКБ ?
У6 – Суднова ЕЕС під'єднана до живлення з берега?
У7 – Потужності живлення з берега достатньо для забезпечення потреб ЕЕС?
У9; У19 – Потужності основних ДГ достатньо для потреб ЕЕС?
У17 – Потужності валогенератора достатньо для потреб ЕЕС?
У11; У21 – Потужності аварійного ДГ достатньо, щоб забезпечити потреби ЕЕС?
П1; П11 – Живлення ЕЕС судна від сонячних панелей та зарядка АКБ;
П2; П12 – Живлення ЕЕС судна від сонячних панелей без зарядки АКБ;
П3; П13 – Живлення ЕЕС судна від АКБ;
П4 – Живлення ЕЕС судна від електропостачання з берега, та зарядка АКБ;
П5 - Живлення ЕЕС судна від електропостачання з берега без зарядки АКБ;
П6; П16 – Живлення ЕЕС судна від основних ДГ, та зарядка АКБ;
П14 – Живлення ЕЕС судна від валогенератора, та зарядка АКБ;
П15 - Живлення ЕЕС судна від валогенератора без зарядки АКБ;
П7; П17 - Живлення ЕЕС судна від основних ДГ без зарядки АКБ;
П8; П18 – Повне знеструмлення мережі ЕЕС судна (Blackout);
П9; П19 - Живлення ЕЕС судна від аварійного ДГ, та зарядка АКБ;
П10; П20 - Живлення ЕЕС судна від аварійного ДГ без зарядки АКБ;

У підсумку можна зазначити, що основної метою досліджень в цьому напрямку є розробка та впровадження гібридних СЕЕС для підвищення ефективності використання палива, зниження викидів шкідливих речовин у відповідності до екологічних стандартів, з акцентом на економічну доцільність та надійність системи.

Одним з основних недоліків впровадження гібридних СЕЕС є їх висока вартість та необхідність оптимізації їхньої ефективності для кожного з типів суден. В контексті досягнення мети, основні шляхи усунення недоліків або зменшення їх вагомості, є вирішення наступних задач:

- розробка більш надійних, енергоефективних та доступних АКБ та сонячних панелей;
- розробка універсальних рішень для різних типів суден.

З точки зору впровадження результатів наведених досліджень, можна констатувати, що впровадження гібридних СЕЕС у виробництво є можливим, але його ефективність залежить від економічної доцільності та можливостей судноплавних компаній здійснювати довгострокові інвестиції. Системи гібридного живлення потребують значних капіталовкладень, але окупність проєкту в межах 4-5 років може бути привабливою для підприємств [9-14].

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку алгоритмів автоматизації роботи гібридних СЕЕС [15, 16] пошук економічно ефективних технологій виробництва та накопичення електроенергії, а також вивчення можливостей оптимального використання сонячних панелей на судах різного розміру [17, 18].

Основної метою досліджень в цьому напрямку є розробка та впровадження гібридних СЕЕС для підвищення ефективності використання палива, зниження викидів шкідливих речовин у відповідності до екологічних стандартів, з акцентом на економічну доцільність та надійність системи.

Одним з основних недоліків впровадження гібридних СЕЕС є їх висока вартість та необхідність оптимізації їхньої ефективності для кожного з типів суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. Meng, L. Ship allocation considering energy type and transportation preference: A variational inequality approach / L. Meng, X. Wang, J. He, C. Han // *Advanced Engineering Informatics*. – 2024. – V. 59. – 102291. ISSN 1474-0346. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102291>.
2. Jang, H. Safety evaluation on ammonia-fueled ship: Gas dispersion analysis through vent mast / H. Jang, M.P. Mujeeb-Ahmed, H. Wang, C. Park, I. Hwang, B. Jeong, P. Zhou, A. Papadakis, A. Giannakis, K. Sykaras // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – V. 83. – P. 1060-1077. ISSN 0360-3199. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.027>.
3. Ganjian, M. Optimal design strategy for fuel cell-based hybrid power system of all-electric ships / M. Ganjian, H. B. Farahabadi, M. A. Alirezapouri, M. R. Firuzjaei // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – V. 50, Part B. – P. 1558-1571. ISSN 0360-3199. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.258>.
4. Ципа, А. В. Шляхи підвищення показників ефективності, надійності та економічності роботи суднової електроенергетичної системи / А.В.Ципа, І.М. Гвоздева // *Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика»*, 22.11.2023 - 23.11.2023. – Одеса: НУ ОМА, 2023. – С.72-76 <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/SEEEA-2023.22.11.23.pdf>.
5. Courtesy of Cadex, Choi et al. (2002), B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson and D. Kirschen, "Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment," June 2016 Doi: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>
6. Акумуляторні батареї «Megapack» компанії «Tesla» Doi:<https://www.tesla.com/megapack/design>
7. High Voltage System on Ships, Doi:<https://marineengineeringonline.com/high-voltage-system-ships/>
8. Бічев В.І. Дослідження якості електроенергії вітрогенераторної установки / В.І. Бічев, В.О. Артюх, В.В. Будашко / III науково-технічна конференція молодих вчених «Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті», 22.11.2023-23.11.2023 – Одеса: НУ ОМА, 2023. – С.15-20. <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/IandTMIWT-2023.22.11.23.pdf>.
9. LEROY SOMER Marine Solutions/Proven solutions for Marine applications Propulsion & Power Grid 6097 en - 2022.06 / а. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/6097_en.pdf
10. Budashko, V. V. Increasing the efficiency of hybrid propulsion complexes for multipurpose vessels by different criteria of the energy management strategies [Text] / V. V. Budashko // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. – 2019. – V. 10 (50). – P. 53-62. Режим доступу: \WWW/ URL: https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_1050_oct_2019_part_4.pdf. – 5.11.2024 р. – Загол. з екрану.
11. Hvozdeva, I. Problems of Improving the Diagnostic Systems of Marine Diesel Generator Sets [Text] / I. Hvozdeva, V. Myrhorod, V. Budashko, V. Shevchenko // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 25-29 Feb. 2020, Ukraine: IEEE. – P. 350-354. Doi: [10.1109/TCSET49122.2020.235453](https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235453).
12. Budashko, V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes [Text] / V. Budashko // *International journal of energy and environment*. – 2020. – V. 14. – P. 5-8, ISSN: 2308-1007. Doi: [10.46300/91012.2020.14.2](https://doi.org/10.46300/91012.2020.14.2).
13. Budashko, V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes [Text] / V. Budashko // 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, 12-13 June 2020, Turkey: IEEE. Pp. 1-6. Doi: [10.1109/ICECCE49384.2020.9179301](https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179301).
14. Швидкий О.С. Валогенератор-двигун з широтно-імпульсною модуляцією / О.С. Швидкий, К.В. Кардіако, В.В. Будашко / III науково-технічна конференція молодих вчених «Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті», 22.11.2023-23.11.2023 – Одеса: НУ ОМА, 2023. – С. 6-13. <http://femire.onma.edu.ua/docs/conf/IandTMIWT-2023.22.11.23.pdf>

15. Myrhorod, V. Multi-parameter Diagnostic Model of the Technical Conditions Changes of Ship Diesel Generator Sets [Text] / V. Myrhorod, I. Hvozdeva, V. Budashko // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, 21-25 Sept. 2020, Ukraine: IEEE. Pp. 1-5. Doi: [10.1109/PAEP49887.2020.9240905](https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240905).
16. SIEMENS Low Voltage Engineering manual Version 6.7 – June 2020, Supplement to Catalogs D 11 and D 21.3., 2020. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/185/83180185/att_1026522/v1/G130_G150_S120_S150_ext_config_man_0620_en-US.pdf
17. Будашко, В. В. Високовольтні технології в морській електроінженерії: монографія [Текст] / В. В. Будашко, О. М. Піпченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко // Одеса: НУ «ОМА», 2020. – 398 с. ISBN 978-617-7857-02-9.
18. Budashko, V. Power plant, propulsion complex and control system of autonomous dual-purpose underwater vehicle [Text] / V.V. Budashko // 15th International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC/iSCSS 2020), 5-9 October 2020, Virtual online conference. Pp. 1-9. Aviable at: <https://events.rdmobile.com/Lists/Details/1071014>.