

УДК 621.472(043)

DOI 10.47049/2226-1893-2023-1-80-90

**ОЦІНКА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПАРУСНО-МОТОРНОЇ ЯХТИ
З СИЛОВОЮ ГЕЛІОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ**

С.Ю. Хотін

к.т.н., доцент кафедри «Безпека життєдіяльності, екологія та хімія»

ORCID: 0000-0003-2424-9276

e-mail: enhelios@ukr.net

О.В. Демідюк

к.т.н., завідувач кафедри

«Теорія і проектування корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова»

ORCID: 0009-0002-1450-4077

e-mail: alexanderdemidiuk@gmail.com

В.М. Палагута

к.т.н., доцент кафедри «Безпека життєдіяльності, екологія та хімія»

ORCID: 0000-0002-7001-2264

e-mail: vitpala@yahoo.com

С.М. Перетяка

к.т.н., доцент кафедри «Безпека життєдіяльності, екологія та хімія»

ORCID: 0000-0003-4058-4525

e-mail: peretyakaserg@ukr.net

О.Є. Васильченко

асистент кафедри «Безпека життєдіяльності, екологія та хімія»

ORCID: 0000-0002-8480-0384

e-mail: sashaod3819@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

***Анотація.** Виконано оцінку техніко-економічних характеристик вітрильно-моторної яхти з силовою геліоенергетичною установкою. Визначено можливу потужність фотоелектричної системи яхти, її максимальну швидкість і дальність ходу від добової зарядки акумуляторів за рахунок енергії сонячної радіації. Показано, що експлуатаційні витрати на яхту з геліоенергетичною системою водотоннажністю близько 20 т. у літній період року будуть значно менші або порівнянні з аналогічним показником вітрильно-моторних яхт з силовою установкою на базі ДВС, що робить їх конкурентними з останніми.*

***Ключові слова:** яхта, судно, вітрило, фотоелементи, геліоенергетична система, силова установка, площа, потужність, електроенергія, швидкість, хід, вартість, паливо.*

© Хотін С.Ю., Демідюк О.В., Палагута В.М., Перетяка С.М., Васильченко О.Є., 2023

UDC 621.472(043)

DOI 10.47049/2226-1893-2023-1-80-90

EVALUATION OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC CHARACTERISTICS
OF A SAIL-MOTOR YACHT WITH A POWER SOLAR PLANTS

S. Khotin

PhD, Associate Professor, Department «Health and safety, ecology and chemistry»

ORCID: 0000-0003-2424-9276

e-mail: enhelios@ukr.net

O. Demidiuk

PhD, head

of a department «Ship theory and design department named after prof. Y. Vorobyov»

ORCID: 0009-0002-1450-4077

e-mail: alexanderdemidiuk@gmail.com

V. Palahuta

PhD, Associate Professor, Department «Health and safety, ecology and chemistry»

ORCID: 0000-0002-7001-2264

e-mail: vitpala@yahoo.com

S. Peretyaka

PhD, Associate Professor, Department «Health and safety, ecology and chemistry»

ORCID: 0000-0003-4058-4525

e-mail: peretyakaserg@ukr.net

O. Vasilchenko

Assistant, Department «Health and safety, ecology and chemistry»

ORCID: 0000-0002-8480-0384

e-mail: sashaod3819@gmail.com

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

Abstract. *An assessment of the technical and economic characteristics of a sailing-motor yacht with a power solar power plant was carried out. Its design features are described. The possible power of the photovoltaic system of the yacht, its maximum speed and range from the daily charging of the batteries due to the energy of solar radiation are determined. Also, the amount of diesel fuel was determined, which is saved due to the daily charging of the yacht's batteries from photocells, and its cost was calculated. It is shown that the operating costs for a yacht with a solar power system with a displacement of about 20 tons in the summer period of the year will be significantly less or comparable to those of sailing and motor yachts with a power plant based on an internal combustion engine, which makes them competitive with the latter. In addition, the expediency of the mass use of such yachts for recreation and travel is substantiated.*

Keywords: *yacht, ship, sail, photocells, solar energy system, power plant, area, power, electric power, speed, course, cost, fuel.*

Вступ. Досить перспективним є застосування геліоенергетичних систем на морському транспорті та відповідні наукові розробки в таких сферах як геліоенергетичні системи для забезпечення електричної енергії суден без традиційних силових енергетичних установок та системи електропостачання вітрильних суден на основі фотоелектричних установок.

Перші два напрями, пов'язані з розробкою та створенням геліоенергетичних систем для енергопостачання суден без традиційних енергетичних установок: барж, яхт, катерів, рятувальних шлюпок тощо. При цьому судна рухаються за допомогою електродвигунів, а електрика виробляється фотоелементами, що знаходяться на борту судна.

Однак місця для розміщення фотоелементів на палубі та відкритих ділянках надбудов мають обмежену площу, тому фотобатареї не забезпечують швидкого поповнення та накопичення енергії в достатньому обсязі для забезпечення роботи ходового двигуна необхідної потужності. Судна виходять тихохідними з максимальною швидкістю руху 4-5 вузлів (7-9 км/год.), що не забезпечує нормальну динаміку руху, або ж фотобатареї стають допоміжним джерелом енергії для освітлення, навігаційних та опалювальних систем.

Тим часом набагато більший інтерес представляє оснащення геліоенергетичними системами таких суден, як вітрильні яхти, де фотоелементи можна розміщувати не тільки на поверхнях палуби, надбудови та корпусу, але й на вітрилах, що збільшує їхню загальну робочу поверхню та потужність енергоустановки більш ніж удвічі. До того ж позитивну роль грає більш добра (в умовах обмеженої тяги вітрил) гідродинамічна проробка корпусів вітрильних яхт, що потенційно зменшує відносну потужність двигунів таких суден – тобто кількість кВт на одну тону водомісткості.

Тому, метою даної роботи є оцінка техніко-економічних показників вітрильно-моторної яхти з силовою геліоенергетичною установкою і підтвердження її економічної конкурентоспроможності з яхтами аналогічного типу, оснащеними ДВС.

Основна частина статті. Як об'єкт дослідження розглянемо одну з типових моделей круїзних вітрильних яхт, довжиною 27 футів [1] та водотоннажністю приблизно 18-20 т з вітрильним озброєнням типу «бермудський шлюп». Її зображення представлено на рис. 1 (а). Сучасні вітрильні яхти такого класу, обладнані геліоенергетичними системами вже існують на ринку [2; 3], дивись рис. 1 (б). Крім того створені проекти яхт більших розмірів і відповідно потужності [4; 5], які ще чекають своєї реалізації.

Основна ідея полягає в тому що фотоелементи розміщуються не тільки на поверхнях палуби, надбудові та корпусі, але й на вітрилах. Технологічно це стало можливо завдяки застосуванню плівкових фотоелементів, основою для яких є високоміцні плівки з полімерних синтетичних матеріалів. З такого матеріалу можна виготовляти вітрила.



Albin Vega 27

Bluewinerboats.org
THIS IMAGE IS FREE TO USE PROVIDED THE ATTRIBUTION REMAINS. © GUYE.COM/11111111

Рис. 1 (а). Зразок вітрильної яхти



*Рис. 1 (б). Існуючий проект компанії Hallberg-Rassy [2] (б)
з фотоелементами, вбудованими у вітрила*

Завданнями даної роботи є: визначення техніко-економічних характеристик суден такого типу та оцінка економічної доцільності використання таких суден при їх експлуатації, а також орієнтовна оцінка вартості генерації електроенергії судновою фотоелектричною установкою.

Аналіз конструкції яхти середнього класу, водотоннажність якої становить 15-20 т, виконаний авторами показує, що фотоелементи можуть бути змонтовані на горизонтальних поверхнях палуби, надбудови та корпуси сумарною площею приблизно 30-32 м² та на вертикальних поверхнях сумарною площею 32-35 м² [1].

Сумарна потужність фотоелементів, що розташовані на горизонтальних площинах визначається за формулою [6]

$$P_{\Gamma} = J_c \cdot \sin \alpha_{\Pi} \cdot S_{\Pi} \cdot \eta_{\Phi} \cdot k, \quad (1)$$

де J_c – середня щільність сумарної сонячної радіації протягом світлового дня, Вт/м²;

α_{Π} – кут падіння сонячних променів на горизонтальну поверхню, град.;

S_{Π} – площа горизонтальної робочої поверхні фотоелементів, м²;

η_{Φ} – ККД фотоелементів;

k – коефіцієнт пропускання сонячної радіації прозорим захисним покриттям фотоелементів.

При цьому η_{Φ} дорівнює 15 %, а k приймаємо рівним 98 %.

Формула для визначення сумарної потужності вертикально розташованих фотоелементів набуде вигляду

$$P_{\text{в}} = J_c \cdot \cos \alpha_{\Pi} \cdot S_{\Pi} \cdot \eta_{\Phi} \cdot k. \quad (2)$$

З метою спрощення розрахунків приймаємо, що поверхня вітрил, у яких розташовані фотоелементи розташовується строго вертикально. Потужність вертикально розташованих вітрильних фотоелементів може бути визначена за формулою

$$P_{\text{пв}} = J_c \cdot \cos \alpha_{\Pi} \cdot S_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{фп}} \cdot k, \quad (3)$$

де $S_{\text{пр}}$ – площа робочої поверхні вітрильних фотоелементів, м²;

$\eta_{\text{фп}}$ – КПД фотоелементів вітрил.

Коефіцієнт перетворення енергії сонячної радіації на електричну у вітрильних еластичних фотоелементах становить близько 10% [2].

Площа вітрильного озброєння біля яхти середнього класу, водотоннажність якої становить 15-20 т дорівнює приблизно 90-120 м² [1]. Враховуючи те, що можна замінити плівковими фотоелементами 60-65 % вітрильного озброєння невеликих суден, це дозволить отримати додатково від 6 до 7,2 кВт електричної потужності у період астрономічного півдня.

З урахуванням вищезазначеного сумарна потужність фотоелектричної енергосистеми встановленої на судні визначається розрахунковим співвідношенням [4].

$$P = P_{\Gamma} + P_{\text{В}} / 2 + P_{\text{ПВ}} . \quad (4)$$

Розрахунки показують, що її значення становитиме від 14,5 до 15 кВт в період астрономічного півдня. Середньодобова потужність фотоелектричної енергосистеми, встановленої на яхті, матиме значення 7,3-8 кВт. Це дає можливість забезпечити яхті в астрономічний опівдні хід в 5,5-6 вузлів за рахунок електродвигуна, що живиться виключно від фотоелементів [5].

Середньодобову продуктивність вищеописаної геліоенергетичної системи визначаємо за такою формулою.

$$Q = P \cdot \tau , \quad (5)$$

де τ – тривалість ефективного світлового дня, с.

У червні-липні її величина становить близько 10 год.

Таким чином, середньодобова продуктивність фотоелектричної енергосистеми, що описується, складе від 72 до 75 кВт/год.

У той же час, плівкові фотоелементи, розміщені на щоглах, зможуть виконувати і традиційні функції вітрил, хоча і з меншою ефективністю. У нічний час і в похмуру погоду, коли реальна продуктивність роботи фотоелементів знижується в 5÷8 разів, живлення всього бортового електрообладнання може здійснюватися від акумуляторів, які будуть розміщуватися в кільовій частині яхти, замінюючи баласт.

Визначимо відстань, яку здатна пройти вищеописана яхта (хід судна) при добовому зарядженні акумуляторів від фотоелементів. Для цього скористаємося математичним апаратом та результатами натурних випробувань найпоширеніших моделей вітрильно-моторних яхт.

Хід судна визначатиметься потужністю електродвигунів, необхідної для пересування судна із заданою швидкістю [6].

Відстань судна, що проходить, визначається за формулою

$$L = V_h \cdot \tau_x, \quad (6)$$

де τ_x – час ходу судна на добову зарядку акумуляторів за рахунок фотоелементів.

Воно визначається формулою

$$\tau_x = Q / N, \quad (7)$$

де N – потужність суднових електродвигунів, що витрачається, кВт.

Виконані розрахунки показують, що при швидкості ходу в 5 вузлів, яхта зможе подолати на одній добовій зарядці акумуляторів від фотоелектричної бортової енергосистеми відстань приблизно в 95-100 км.

Вартість 1 кВт/год ємності іонно-літєвих батарей становить у середньому близько 190 дол. США [5(9)]. Таким чином, вартість бортових акумуляторів сумарною ємністю 100 кВт/год буде 19000 дол. США. При цьому вартість фотобатарей орієнтовно становитиме 12000-12500 дол. США. Собівартість виробництва електроенергії фотоелементами з урахуванням амортизаційних відрахувань складе за вищеописаних умов 0,42 дол. США за кВт/год, що є досить високим значенням. Собівартість виробленої фотобатарейми електроенергії протягом світлого дня становитиме приблизно 31-33 дол. США. Вартість електроенергії при зарядці акумуляторів у нічний період для двозонних тарифів складе близько 0,03 дол. США.

Оскільки вартість акумуляторів становить понад 60 % від загальної вартості сонячної суднової енергосистеми, скоротивши кількість акумуляторів на 30 %, ми знизимо собівартість 1 кВт/год електроенергії до 0,34-0,35 дол. США.

При цьому у період с 11 до 16 г, коли продуктивність фотобатарей максимальна, електродвигуни живляться безпосередньо від фотоелементів. В інший час світлового дня живлення буде гібридним (фотоелементи та акумулятор), а в нічний час двигуни працюватимуть за рахунок енергії акумуляторів.

Вартість палива, яке буде заощаджено за рахунок застосування фотоелектричної енергосистеми, визначається розрахунковим співвідношенням [8]

$$CF = M \cdot C_T, \quad (8)$$

де M – маса витраченого судновим двигуном палива, кг;
 C_T – вартість 1 кг палива.

$$M = g_E \cdot N \cdot \tau_x, \quad (9)$$

де g_E – питома витрата палива, рівна 0,170 кг/кВт/год;

N – потужність, що розвивається двигуном, кВт.

Виконаємо розрахунки для швидкості 10 км/с. (5,5 вузлів) При цьому потужність двигуна, що розвивається, становитиме 13,5 кВт. Кількість заощадженого при цьому палива становитиме 23 кг.

В якості СЕУ невеликих яхт зазвичай використовуються дизельні двигуни потужністю від 10 до 100 кВт, що споживають дизельне паливо, вартість якого становить у середньому близько 1,2 дол. США за кг [6]. За хід судна на одній добовій зарядці акумуляторів від фотоелементів ми можемо отримати близько 28 дол. США за рахунок палива, що зекономили.

Використовуючи методичку розрахунків, представлену в [8,9], ми можемо визначити ціну одного умовного «дизельного кВт/год». Вона становитиме 0,36-0,4 дол. США.

Зазначимо, що всі розрахунки робилися для штильових погодних умов, коли вітер практично відсутній. За його наявності можна задля забезпечення руху яхти, поруч із електродвигуном, використовувати її вітрильне озброєння, що радикально збільшить її експлуатаційні характеристики.

При необхідності, вдень, живлення ходового електродвигуна може забезпечуватися одночасно і від фотоелементів і від акумулятора, а це дасть можливість збільшувати потужність двигуна вдвічі і більше до 30-35 кВт і швидкості яхти до 10-12 вузлів. Слід зазначити, що заміна частини вітрильного озброєння плівковими фотоелементами можлива тільки для яхт комерційного призначення, оскільки ці плівки не мають необхідних властивостей як традиційні матеріали для пошиття вітрил. Вони менш еластичні та більш важкі. Останнє унеможливає їх застосування на спортивних яхтах.

Висновки. Аналізуючи результати дослідження, можна зробити висновок про те, що собівартість експлуатації яхти з фотоелектричною енергосистемою з акумулятором ємністю 100 кВт/год. буде на 5-10 % більше, ніж у аналогічного судна з традиційною СЕУ, а при ємності акумулятора 70 кВт/год. показник навпаки буде на 3-10 % нижче, ніж у яхти з традиційною СЕУ, що зробить її цілком конкурентною щодо останньої.

Але, беручи до уваги те, що на світовому ринку є тенденція зниження про-
дажної вартості фотоелектричних батарей і іонно-літєєвих акумуляторів, очікується
подальше зниження їх вартості на 20-25 % протягом найближчих 5 років. Це
знизить собівартість електроенергії, виробленою бортовою фотоелектричної
енергосистемою, до 0,26-0,32 дол. США, що зробить яхти на її основі не тільки
конкурентними щодо аналогічних суден з традиційною СЕУ, а й набагато
економічно рентабельними.

Яхти з електричною силовою установкою на базі фотоелектричних систем
будуть екологічно чистими, фактично не забруднюючи довкілля. З урахуванням
падіння в останні роки цін на іонно-літєєві акумулятори та зростання їх питомої
енергоємності, такі яхти знайдуть широке застосування як плавзасоби для
відпочинку та подорожей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Каталог Яхт та Катерів головних світових верфей в Україні.* <https://marine-trade.com.ua/ua/katalog-yakht-i-kateriv>
2. *Офіційна сторінка компанії Hallberg-Rassy, HALLBERG-RASSY VARVS AB. Ellos, SWEDEN, 2021.* URL: <https://www.hallberg-rassy.com/news/news/solar-panel-sails-2021-04> (дата звернення 20.03.2023)
3. *Williamson Max, 2023. Solar Sailing. How J-Boats is leading the way to fuel free sailing.* URL: <https://www.sailorsforthesea.org/blog/solar-sailing> (дата звернення 15.03.2023)
4. *Офіційна сторінка компанії Tuvie інтернет дизайн журнал, 2016.* URL: <https://www.tuvie.com/aquila-50-meter-sailing-yacht-with-flexible-solar-sails/> (дата звернення 15.03.2023)
5. *Cormack Rachel, 2020. Alva Yachts' New Sailing Concept Can Be Powered by Hydrogen for a 'Virtually Unlimited' Range. Robb report.* URL: <https://robbreport.com/motors/marine/alva-yachts-hydrogen-powered-ocean-sail-82-has-unlimited-range-1234571163/> (дата звернення 14.03.2023)
6. *Даффи, Дж., Бекман У. Основы солнечной теплоэнергетики: Уч.-справ. рук. М.: Интеллект, 2013. 888 с.*
7. *Хотін С. Ю. Розробка і дослідження концентруючого колектора з вакуумованими теплоприймачами: Дисертація канд. техн. наук / Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 2001. 185 с.*
8. *Райсянин А. Г. Расчет движительного комплекса винтового судна: Учебн. пособие для ВУЗов. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2010. 39 с.*

9. Хотин С.Ю., Васильченко А.Е. Оценка экономической целесообразности эксплуатации составного судна с фотоэлектрической энергетической установкой. Перша міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні технології для забезпечення безпеки життєдіяльності та довголіття людини»: Тези доповідей. Одеса: ОНМУ, 2018. С. 119-124.
10. Довідник оптових цін на паливо в Україні https://toplivo.app/content/monitoring_optovyykh_tsen_na_toplivo_31_01_2023_obnovleniye_1

REFERENCES

1. Kataloh Yakht ta Kateriv holovnykh svitovyykh verfey v Ukrayini. <https://marine-trade.com.ua/ua/katalog-yakht-i-kateriv>
2. Official website of Hallberg-Rassy, HALLBERG-RASSY VARVS AB. Ellos, SWEDEN, (2021). Retrieved from: <https://www.hallberg-rassy.com/news/news/solar-panel-sails-2021-04> (accessed 20 of March 2023) (in English)
3. Max Williamson, (2023). Solar Sailing. How J-Boats is leading the way to fuel free sailing. Retrieved from: <https://www.sailorsforthesea.org/blog/solar-sailing> (accessed 15 of March 2023) (in English)
4. Aquila : 50-meter Sailing Yacht with Flexible Solar Sails. Official website of Tuvie online design magazine. (2016). Retrieved from: <https://www.tuvie.com/aquila-50-meter-sailing-yacht-with-flexible-solar-sails/> (accessed 15 of March 2023) (in English)
5. Rachel Cormack, (2020). Alva Yachts' New Sailing Concept Can Be Powered by Hydrogen for a 'Virtually Unlimited' Range. Robb report. Retrieved from: <https://robbreport.com/motors/marine/alva-yachts-hydrogen-powered-ocean-sail-82-has-unlimited-range-1234571163/> (accessed 14 of March 2023) (in English)
6. Daffi, Dzh., Bekman U. (2013). Osnovy solnechnoy teploenerhetiki: uch.-sprav. Ruk [Fundamentals of Solar Thermal Engineering: Tutorial.]. M.: Intelekt, 888 s. (in Russian)
7. Khotin S.U. Rozrobka i doslidzhennya kotsentruyuchoho kolektora z vakuumovanymy teploprymachamy. [Development and research of a concentrating manifold with the vacuum-treated heat receivers]: Dysertatsiya kand. tekhn. Nauk. Institut elektrodinamiki NAN Ukraine, Kyiv, 2001. 185 p.
8. Raysyanin A.G. (2010). Raschet dvizhitel'nogo kompleksa vintovogo sudna: uchebnoye posobiye dlya VUZov [Calculation of propulsion system of a propeller ship: Textbook for high school. Khabarovsk: TOGU. 39 s.

9. Khotin S.YU., Vasil'chenko A.E. (2018). *Otsenka ekonomicheskoy tselesoobraznosti ekspluatatsii sostavnogo sudna s fotoelektricheskoy energeticheskoy ustanovkoy* [Assessment of economic feasibility of combined ship operation with a photovoltaic power plant]. – *Persha mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiya «Perspektyvni tekhnolohiyi dlya zabezpechennya bezpeky zhyttyedyal'nosti ta dovholittya lyudyny»: Tezy dopovidey*. Odesa: ONMU, S. 119-124.
10. *Dovidnyk optovykh tsin na palyvo v Ukraini* [Directory of wholesale fuel prices in Ukraine]. Retrieved from: https://toplivo.app/content/monitoring_optovykh_tsen_na_toplivo_31_01_2023_obnovleniye_1

Стаття надійшла до редакції 20.02.2023

Посилання на статтю: Хотін С.Ю., Демідюк О.В., Палагута В.М., Перетяка С.М., Васильченко О.С. Оцінка техніко-економічних характеристик парусно-моторної яхти з силовою геліоенергетичною установкою // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 1 (68). С. 80-90. DOI 10.47049/2226-1893-2023-1-80-90.

Article received 20.02.2023

Reference a JournalArtic: Khotin S., Demidiuk O., Palahuta V., Peretyaka S., Vasilchenko O. Evaluation of the technical and economic characteristics of a sail-motor yacht with a power solar plants // Herald of the Odessa national maritime university. Coll. scient. works, 2023. № 1 (68). 80-90. DOI 10.47049/2226-1893-2023-1-80-90.