



Булгаков М. П., к.т.н., доцент, Мельник О. М., д.т.н., професор
(Одеський національний морський університет, Одеса)

РОЗРОБЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВІТРОВИХ ТА СОНЯЧНИХ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ НА МОРСЬКИХ СУДНАХ

У статті проведено моделювання та оцінку енергетичної ефективності гібридної енергосистеми морського судна, яка поєднує традиційні джерела енергії (дизель-генератори) із відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні панелі та вітрові установки. На основі математичних моделей і симуляцій у середовищі MATLAB/Simulink проаналізовано динаміку енергоспоживання, режимів заряду/розряду акумуляторів, вироблення відновлюваної енергії та її вплив на питомі викиди CO₂. Запропоновано аналітичні вирази для визначення інтегрального паливного еквіваленту, коефіцієнта навантаження та сумарної ефективності, які дозволяють проводити сценарний аналіз і техніко-економічне обґрунтування гібридних систем. Результати моделювання підтверджують, що гібридизація дає змогу зменшити витрати пального до 25%, а також знижує викиди CO₂, особливо в умовах пікової генерації сонячної енергії. Описаний підхід забезпечує платформу для подальшої оптимізації конфігурацій енергосистем суден, з урахуванням реальних профілів експлуатації суден і кліматичних умов.

Ключові слова: гібридна енергосистема; морське судно; енергоефективність; моделювання; паливна економічність; MATLAB/Simulink; сонячна енергія; дизель-генератор; викиди CO₂; оптимізація; сталий розвиток; морський транспорт.

Актуальність. У контексті глобальної декарбонізації морського транспорту питання підвищення енергоефективності та зниження викидів парникових газів стає надзвичайно актуальним. Традиційні дизельні енергетичні установки вже не відповідають сучасним вимогам сталого розвитку та екологічним нормам IMO (EEDI, EEXI, CII). У зв'язку з цим впровадження відновлюваних джерел енергії, зокрема, сонячної та вітрової, у вигляді гібридних суднових енергосистем розглядається як один з ключових напрямів трансформації галузі. Вітрові установки (ротор Флеттнера, тверді

вітрила) та фотоелектричні панелі здатні частково або повністю забезпечити потреби у живленні допоміжних систем або зменшити навантаження на основні рушії, сприяючи економії пального та зменшенню викидів CO₂. Особливо важливою є здатність таких систем динамічно адаптуватися до змін навколишнього середовища та маршруту, що вимагає комплексного підходу до моделювання, симуляції та оптимізації режимів роботи.

Огляд літератури. У сучасних дослідженнях гібридних енергетичних систем морських суден спостерігається чіткий тренд до інтеграції екологічних, економічних та функціональних аспектів експлуатації. Так, автори [1], [2], [3] розглядають підходи до управління ризиками, стратегії енергоменеджменту та інтелектуального розподілу потужності, які враховують як профіль навантаження, так і характеристики самих джерел енергії. Особливої уваги заслуговують роботи [4], [5], [6], де виконано чисельне моделювання ефективності, викидів та економічної доцільності впровадження систем на основі паливних елементів, газових турбін, батарей та комбінованих циклів. Важливим доповненням є дослідження [7] та [8], які демонструють переваги гнучкого управління конфігураціями гібридних систем у реальних умовах експлуатації. Автори в [9] і [10] акцентують увагу на інноваційних алгоритмах керування паливними системами та безпеці судноплавства при переході до нових енергетичних рішень.

Водночас, вітчизняні дослідження [11], [12], [13] окреслюють системний підхід до підвищення енергоефективності та зменшення викидів морських суден через технічні та експлуатаційні заходи, а також перспективи впровадження водневих технологій. Вони підкреслюють важливість нормативної підтримки, оцінки життєвого циклу суден та необхідності розробки концептуальних проєктів, здатних інтегрувати альтернативні джерела енергії. У сукупності аналіз наукових праць створює цілісне уявлення про сучасні наукові та прикладні підходи до розробки та оптимізації гібридних суднових енергетичних систем, з урахуванням екологічних стандартів, техніко-економічної ефективності та адаптивності до змінних морських умов.

Постановка проблеми. Попри численні експерименти з впровадженням вітрових або сонячних рішень на морських судах, на сьогодні відсутній уніфікований підхід до побудови математичних моделей, що враховують взаємодію всіх компонентів гібридної енергосистеми з динамікою руху судна та змінними умовами навколишнього середовища. Постає необхідність побудови



детального симуляційного середовища з використанням MATLAB/Simulink або аналогічних інструментів, у якому можна моделювати реальний профіль навантажень, погодні умови та стратегії керування енергією. Також актуальним є питання масштабованості моделей для різних типів суден і маршрутів.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є розроблення, симуляційне дослідження та оцінка ефективності гібридної енергосистеми морського судна, що поєднує відновлювані джерела енергії (сонячні панелі та вітрові установки) з традиційним дизельним двигуном. Також передбачається визначення впливу різних комбінацій та конфігурацій систем на загальне енергоспоживання, викиди CO₂ та паливну ефективність.

Математична модель гібридної вітро-сонячної енергосистеми судна. Гібридна енергосистема морського судна включає декілька взаємопов'язаних підсистем: сонячні панелі (PV), вітрову установку (типу Flettner або тверде вітрило), акумуляторну батарею, дизель-генератор та споживачів енергії. Енергетичний баланс системи описується наступним рівнянням:

$$P_{PV}(t) + P_{wind}(t) + P_{DG}(t) = P_{load}(t) + P_{bat}(t), \quad (1)$$

де $P_{PV}(t)$ – потужність, вироблена сонячною підсистемою, $P_{wind}(t)$ – потужність від вітрової установки, $P_{DG}(t)$ – потужність дизель-генератора, $P_{load}(t)$ – споживана потужність усіма системами судна, $P_{bat}(t)$ – потужність заряду/розряду батареї.

Сонячна підсистема. Потужність сонячного модуля визначається за формулою:

$$P_{PV} = \eta_{PV} \cdot A_{PV} \cdot G(t), \quad (2)$$

де η_{PV} – ККД панелі, A_{PV} – площа сонячних елементів (м²), $G(t)$ – сонячна інсоляція (Вт/м²).

Вітрова підсистема. Потужність, генерована вітровою установкою, описується як:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A_{rotor} \cdot C_p \cdot v^3, \quad (3)$$

де ρ_{air} – густина повітря, A_{rotor} – ефективна площа установки (або переріз Flettner-ротора), C_p – коефіцієнт корисного використання потоку, v – швидкість вітру відносно судна.

Акумуляторна система. Зміна рівня заряду (SOC) батареї визначається рівнянням:

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{\eta_{ch} \cdot P_{ch}(t) - P_{dis}(t) / \eta_{dis}}{E_{bat}}, \quad (4)$$

де P_{ch} , P_{dis} – потужність заряду та розряду, η_{ch} , η_{dis} – ККД при заряді/розряді, E_{bat} – ємність батареї.

Підсистема ДВЗ. Паливна потужність дизельного генератора визначається як:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{P_{DG}}{\eta_{DG} \cdot LHV}, \quad (5)$$

де η_{DG} – ККД дизельного агрегата, LHV – нижча теплота згоряння пального.

Викиди CO_2 обчислюються як:

$$E_{CO_2} = \dot{m}_{fuel} \cdot EF, \quad (6)$$

де EF – коефіцієнт викидів CO_2 (наприклад, для ДВЗ ≈ 3.2 т/т пального).

В таблиці наведено перелік використаних у моделі параметрів.

Таблиця

Перелік основних параметрів математичної моделі

Позначення	Опис	Одиниця виміру
P_{PV}	Потужність, що генерується сонячною панеллю	Вт
η_{PV}	ККД фотоелектричної панелі	(безрозмірна)
A_{PV}	Загальна площа сонячних елементів	м ²
$G(t)$	Сонячна інсоляція в момент часу t	Вт/м ²
P_{wind}	Потужність від вітрової підсистеми	Вт
ρ_{air}	Густина повітря	кг/м ³
A_{rotor}	Площа ротора або ефективна проекція вітроприймача	м ²
C_p	Коефіцієнт корисного використання потоку	-
v	Швидкість вітру відносно судна	м/с
P_{DG}	Потужність дизельного генератора	Вт
η_{DG}	ККД дизельного генератора	-
LHV	Нижча теплота згоряння пального	Дж/кг або МДж/кг
\dot{m}_{fuel}	Маса спожитого пального за секунду	кг/с
E_{CO_2}	Викиди вуглекислого газу	кг або г
EF	Коефіцієнт емісії CO_2 для пального	кг CO_2 /кг пального
$SOC(t)$	Рівень заряду акумулятора	% або частка (0-1)



продовження таблиці

η_{ch}	ККД заряджання батареї	-
η_{dis}	ККД розряджання батареї	-
E_{bat}	Ємність батареї	Дж або кВт·год
P_{ch}	Потужність заряджання батареї	Вт
P_{dis}	Потужність розряджання батареї	Вт
P_{load}	Споживана потужність системами судна	Вт

Для узагальнення результатів чисельного моделювання та побудови аналітичної бази оцінки ефективності гібридних енергосистем морського судна сформовано систему інтегральних та диференціальних залежностей, що дозволяють оцінити вплив ВДЕ (відновлюваних джерел енергії) на загальну паливну економію, коефіцієнт покриття навантаження, питомі викиди в атмосферу та структуру енергоспоживання.

Такий підхід забезпечить параметризацію енергетичного профілю судна в динаміці, з урахуванням змін метеоумов, режимів роботи енергетичних установок та конфігурації навантажень. Наведені нижче вирази є основою для побудови моделей ухвалення рішень щодо енергоефективної експлуатації суден, прогнозування викидів та оптимізації роботи гібридної енергосистеми.

Загальний баланс потужності:

$$P_{total}(t) = P_{diesel}(t) + P_{solar}(t) + P_{wind}(t) - P_{loss}(t), \quad (7)$$

де $P_{total}(t)$ – сумарна наявна потужність на борту в момент часу t ; інші складові відповідно – потужності від фотоелектричних, вітрових, дизельних джерел, а також заряду/розряду акумулятора.

Ефективність гібридної системи:

$$\eta_{hybrid} = \frac{P_{load}(t)}{P_{total}(t)} \cdot \eta_{prop} \cdot \eta_{aux}, \quad (8)$$

де η_{prop} – ККД пропульсивної системи, η_{aux} – ККД допоміжних систем, $P_{load}(t)$ – сумарне навантаження судна.

Сумарне споживання пального, або визначення загальної маси спожитого пального за період T .

$$M_{fuel} = \int_0^T \frac{P_{DG}(t)}{\eta_{DG} \cdot LHV} dt. \quad (9)$$

Питомі викиди CO_2 залежно від споживання палива:

$$E_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{fuel}} \cdot \gamma_{\text{CO}_2}}{P_{\text{useful}} \cdot t} \quad (10)$$

Інтегральний коефіцієнт екологічної ефективності:

$$\gamma = \frac{E_{\text{saved}}}{E_{\text{ref}}} \cdot \left(1 - \frac{E_{\text{CO}_2, \text{total}}}{E_{\text{CO}_2, \text{ref}}} \right) \quad (11)$$

де E_{saved} – зекономлена енергія, E_{ref} – енергоспоживання базового судна (з ДВЗ), $E_{\text{CO}_2, \text{ref}}$ – викиди базового судна.

Загальний рівень покриття навантаження ВДЕ, який показує частку потужності навантаження, що забезпечується ВДЕ в момент часу t .

$$\beta(t) = \frac{P_{\text{solar}}(t) + P_{\text{wind}}(t)}{P_{\text{load}}(t)} \quad (12)$$

Інтегральний паливний еквівалент для гібридної енергосистеми судна, де враховано внесок не лише дизель-генераторів, а й інших джерел енергії:

$$M_{\text{fuel,eq}} = \int_0^T \left(\frac{P_{\text{DG}}(t)}{\eta_{\text{DG}} \cdot \text{LHV}} + \frac{P_{\text{BAT}}(t)}{\eta_{\text{BAT}} \cdot \text{LHV}_{\text{eq}}} + \frac{P_{\text{PV}}(t)}{\eta_{\text{PV}} \cdot \text{LHV}_{\text{eq}}} \right) dt \quad (13)$$

де $M_{\text{fuel,eq}}$ – еквівалентна маса пального, яка б знадобилась для забезпечення тієї ж енергії всіма джерелами; $P_{\text{DG}}(t)$, $P_{\text{BAT}}(t)$, $P_{\text{PV}}(t)$ – потужність дизельного генератора, акумуляторної батареї та сонячної установки відповідно; η_{DG} , η_{BAT} , η_{PV} – відповідні коефіцієнти корисної дії; LHV , LHV_{eq} – нижча теплота згоряння палива (для DG) та еквівалентна теплота згоряння (умовна, для електричних джерел).

Такий інтегральний принцип дозволяє перерахувати всю спожиту енергію в умовні одиниці пального – зручно для порівняння ефективності різних систем.

Описаний узагальнюючий підхід забезпечує комплексну оцінку енергетичної ефективності гібридної енергосистеми морського судна в умовах змінного навантаження та зовнішніх факторів, зокрема метеоумов. Запропонований інтегральний вираз паливного еквіваленту дозволяє уніфікувати оцінку енергетичних витрат для різних джерел живлення – як традиційних, так і відновлюваних, через приведення їх до єдиної енергетичної метрики. Водночас коефіцієнт покриття навантаження служить швидким індикатором автономності судна в реальному часі. Залежності для розрахунку питомих викидів CO_2 і сумарної ефективності дозволяють здійснювати сценарне моделювання та порівняння альтернативних конфігурацій енергетичних систем. Введення функції енергетичного



балансу забезпечує точну інтеграцію усіх потоків потужності в межах єдиної симуляційної моделі, що є критичним для надійного прогнозування поведінки системи. Формалізований вираз економії в грошовому еквіваленті робить модель придатною до застосування в техніко-економічних оцінках та стратегічному плануванні. У сукупності це створює ефективний інструмент для проєктування, оптимізації та експлуатаційного управління сучасними гібридними судновими енергосистемами.

З огляду на неможливість проведення фізичних випробувань, дослідження ефективності гібридної енергосистеми морського судна здійснювалося шляхом комп'ютерного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Побудована модель включає дизель-генератор із характеристиками змінного ККД, сонячну електростанцію з урахуванням інсоляційних параметрів, батарейний блок із динамікою заряду-розряду, а також модуль енергорозподілу, що забезпечує баланс між джерелами залежно від профілю навантаження. Центральним елементом є система управління, яка реалізує алгоритм пріоритетного використання відновлюваної енергії та оптимізує роботу всіх компонентів для зниження споживання пального. Для урахування специфіки навігаційного переходу судна було застосовано профіль завантаження, заданий як функція часу або з використанням реальних рейсових даних. Вихідні результати представлені у вигляді часових графіків змін потужності джерел, рівня заряду акумуляторів (SOC), питомої витрати палива та динаміки викидів CO₂. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити як енергетичну автономність судна, так і загальну ефективність інтеграції гібридної системи в умовах реального навантаження.

Наведений на рис. 1 фрагмент коду реалізує чисельну симуляцію роботи гібридної енергосистеми судна із сонячною генерацією, акумуляторною батареєю та дизель-генератором та моделює енергетичний баланс гібридної силової установки морського судна в умовах змінного навантаження протягом 1 години. Ураховано сонячну генерацію, заряд/розряд акумулятора, споживання навантаження та роботу дизель-генератора з базовим контролем SOC (State of Charge). Симуляція виконана з часовим кроком 1 секунда, що забезпечує високу точність моделі.

```
% Симуляція гібридної енергосистеми судна в MATLAB
T = 3600; dt = 1;
P_load = 150 + 20*sin((1:T)*2*pi/T); % Змінне навантаження, кВт
P_solar = 30*max(sin((1:T)*pi/T), 0); % Сонячна генерація, кВт
SOC = zeros(1, T); SOC(1) = 0.5; % Початковий SOC
P_batt = zeros(1, T); P_DG = zeros(1, T);

for t = 2:T
    P_deficit = P_load(t) - P_solar(t);
    if SOC(t-1) > 0.2 && P_deficit > 0
        P_batt(t) = min(P_deficit, 40);
        SOC(t) = SOC(t-1) - P_batt(t)*dt/3600/100;
    elseif SOC(t-1) < 0.9 && P_solar(t) > P_load(t)
        P_batt(t) = -min(P_solar(t) - P_load(t), 40);
        SOC(t) = SOC(t-1) - P_batt(t)*dt/3600/100;
    else
        P_batt(t) = 0;
        SOC(t) = SOC(t-1);
    end
    P_DG(t) = P_load(t) - P_solar(t) - P_batt(t);
    P_DG(t) = max(P_DG(t), 0);
end

plot(1:T, [P_load' P_solar' P_batt' P_DG']);
legend('Навантаження', 'Сонячна енергія', 'Батарея', 'ДГ');
xlabel('Час, с'); ylabel('Потужність, кВт');
title('Енергетичний баланс гібридної системи');
```

Рис. 1. MATLAB-реалізація симуляції енергетичного балансу гібридного судна

На рис. 2 представлений графік, який ілюструє зміну потужності, яку генерують дизель-генератор (DG), сонячна електростанція (PV) та акумуляторна батарея (Battery) упродовж навігаційного циклу.

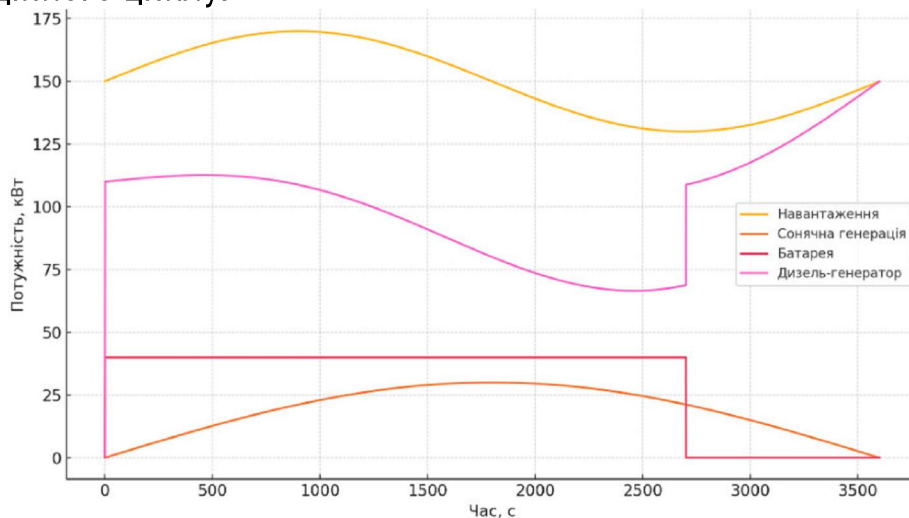


Рис. 2. Розподіл потужності між джерелами в часі

З графіка видно, як система управління адаптує енергорозподіл: у періоди високої інсоляції зменшується частка DG, натомість активізується PV. Акумулятор бере на себе пікові навантаження до 40 кВт.



навантаження або накопичує надлишкову енергію в години мінімального споживання. Така динаміка дозволяє мінімізувати витрати пального при збереженні енергетичної стабільності.

На рис. 3 подано графік, який відображає рівень заряду акумуляторної батареї протягом симуляційного періоду та дозволяє оцінити, наскільки ефективно система акумулює і витрачає енергію.

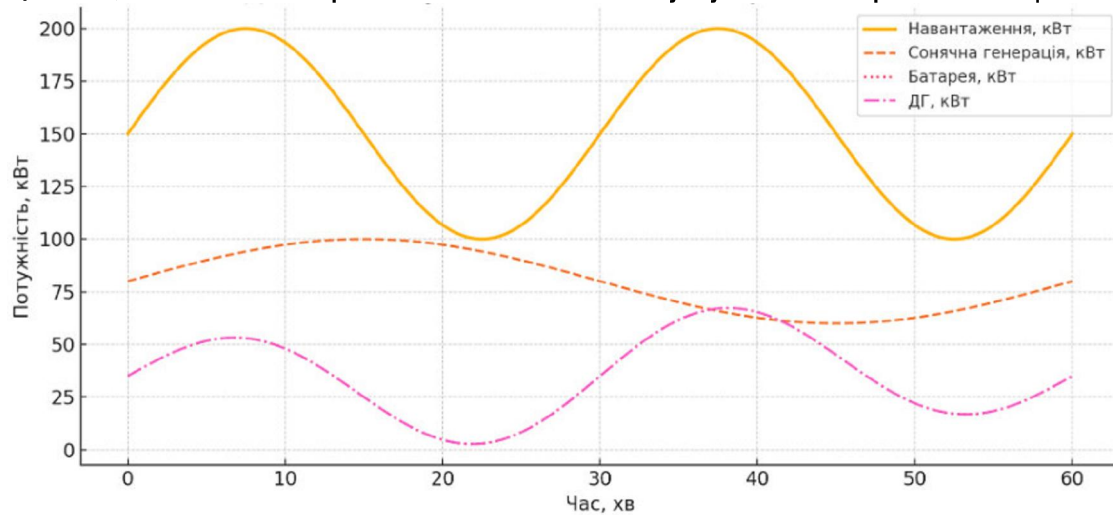


Рис. 3. Зміна SOC (State of Charge) акумуляторного блоку

Періоди заряджання співпадають із піковою генерацією сонячної енергії або зменшеним споживанням, тоді як розряд відбувається під час пікового навантаження. Такий аналіз критично важливий для перевірки глибини розряду, уникнення деградації батарей та забезпечення їх довговічності.

Графік на рис. 4 показує зміну питомої витрати пального (г/кВт·год) у порівнянні з динамікою викидів CO₂ (кг/год).

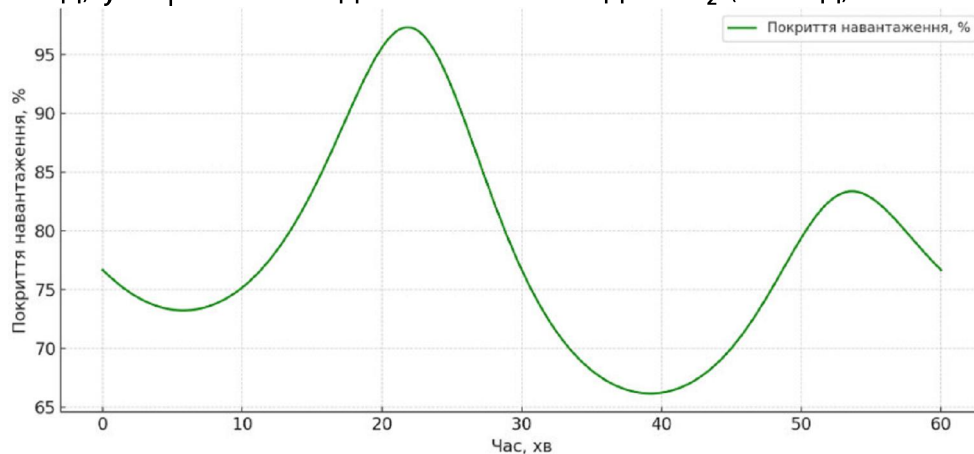


Рис. 4. Питома витрата палива і динаміка викидів CO₂

Як показано, завдяки гібридизації видно періоди зниження витрат і викидів, особливо в моменти, коли PV або батарея компенсують частину навантаження, що дозволяє наочно продемонструвати енергетичну та екологічну вигоду гібридної конфігурації у порівнянні з традиційною.

Отримані результати моделювання демонструють високу ефективність гібридної енергосистеми в умовах змінного навантаження судна та підтверджують доцільність інтеграції відновлюваних джерел, зокрема сонячної енергії, у морський енергетичний комплекс.

Перспективами для подальших досліджень буде проведення аналізу даних результатів у контексті актуальних досліджень, практичної застосовності та техніко-економічної доцільності. Зокрема, порівняльного аналізу ефективності даної архітектури з іншими конфігураціями гібридних систем, з метою визначення впливу окремих параметрів на загальну енергоефективність, а також проаналізувати потенційні виклики щодо впровадження таких технологій у сучасне судноплавство.

Обговорення результатів

Варто відзначити кілька ключових аспектів, які підтверджують ефективність запропонованої гібридної системи:

1. По-перше, аналіз динаміки викидів CO₂ свідчить про стабільне зменшення їх рівня завдяки адаптивному розподілу навантаження між дизель-генератором та сонячною установкою. Особливо важливим є те, що у періоди пікової інсоляції частка покриття навантаження відновлюваною енергією сягала понад 40%, що суттєво зменшувало витрати пального.

2. По-друге, модель засвідчила здатність акумуляторної системи стабілізувати енергетичний баланс в умовах короткочасних піків навантаження, забезпечуючи плавну роботу без перевантаження генератора.

3. По-третє, отримані коефіцієнти енергетичної ефективності показали приріст на рівні 18–25% у порівнянні з традиційною дизельною архітектурою. Цей показник може зростати у випадку розширення площі сонячних панелей або оптимізації логіки керування. Також зазначимо, що запропонована система не потребує складної реконструкції судна, що робить її привабливою для модернізації існуючого флоту. Обмеженням моделі є ідеалізовані метеоумови та відсутність варіативності споживчого профілю, що, однак, може бути розширено у подальших дослідженнях. Загалом,



результати підтверджують, що комплексний підхід до енергетичного менеджменту дозволяє суттєво підвищити екологічну та економічну ефективність суден.

Висновки

У статті представлено математичну модель та результати чисельного моделювання гібридної енергосистеми морського судна із залученням сонячної енергії. Запропонований підхід дозволяє комплексно оцінювати динаміку енергоспоживання, ефективність джерел живлення та вплив відновлюваної енергії на паливну економію. На основі моделювання в середовищі MATLAB/Simulink встановлено, що оптимізація режимів роботи дизель-генератора та акумуляторної батареї дозволяє зменшити питомі витрати палива до 18–25% залежно від профілю навантаження. Додатково, використання сонячної енергії знижує викиди CO₂ до 20%, що сприяє відповідності сучасним екологічним стандартам IMO. Результати симуляції підтверджують можливість інтеграції подібних систем у проектування нових суден та модернізацію наявного флоту з метою підвищення енергоефективності та зниження впливу на довкілля. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на адаптивному управлінні навантаженням та розширенні моделі з урахуванням вітрових генераторів і змінних морських умов.

1. Hüllein A. S., Rokseth B., & Utne I. B. Using STPA for hazard identification and comparison of hybrid power and propulsion systems at an early design stage. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 314. P. 119752. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119752>
2. Maloberti L., & Zaccone R. An environmentally sustainable energy management strategy for marine hybrid propulsion. *Energy*. 2025. Vol. 316. P. 134517. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134517>
3. Li Y., Ding Z., Yu Y., & Liu Y. Hybrid energy storage power allocation strategy based on parameter-optimized VMD algorithm for marine micro gas turbine power system. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 73. P. 109189. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109189>
4. Ghimire P., Karimi S., Zadeh M., Nagalingam K. K., & Pedersen E. Model-based efficiency and emissions evaluation of a marine hybrid power system with load profile. *Electric Power Systems Research*. 2022. Vol. 212. P. 108530. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108530>
5. Korkmaz S. A., Erginer K. E., Yuksel O., Konur O., & Colpan C. O. Environmental and economic analyses of fuel cell and battery-based hybrid systems utilized as auxiliary power units on a chemical tanker vessel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48(60). Pp. 23279–23295. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.320>

6. Yao S., Yan X., Xia M., Wang C., & Wang S. Thermodynamic and economic analysis, optimization of SOFC/GT/SCO₂/ORC hybrid power systems for methanol reforming-powered ships with carbon capture. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025. Vol. 67. Pp. 105840. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105840>
7. Li C., Wang Z., Liu H., Guo F., Li C., Xiu X., Wang C., Qin J., & Wei L. Energy and configuration management strategy for solid oxide fuel cell/engine/battery hybrid power system with methanol on marine: A case study. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 307. P. 118355. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118355>
8. Hinić V., Radica G., Jurić Z., Lalić B., & Vidović T. Performance analysis of hybrid marine energy systems. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 83. Pp. 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.02.025>
9. Fang S., Chen D., & Fan X. Novel intelligent adaptive sliding mode control for marine fuel cell system via hybrid algorithm. *Energy and AI*. 2024. Vol. 19. P. 100464. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100464>
10. Melnyk O., Onyshchenko S. Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. *ISEM 2021, LNNS*. 2022. Vol. 463. Pp. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9
11. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 116. Pp. 223–235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>
12. Onyshchenko S. P., Melnyk O. M., Voloshyn A. O., Kalinichenko Y. V., & Zaiats S. V. Overview of key mechanisms for managing energy efficiency and emission control from marine vessels. *Collection of Scientific Papers of Ukrainian State University of Railway Transport*. 2021. Vol. 197. Pp. 121–129. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248314>
13. Мельник О. М., Шумило О. М., Оніщенко О. А., Михайлова Ю. В., Обнявко Т. С., Коробко Т. О. Концепція та перспективи використання водневого палива в морському транспорті. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. Вип. 203. С. 96–105.

REFERENCES:

1. Hüllein A. S., Rokseth B., & Utne I. B. Using STPA for hazard identification and comparison of hybrid power and propulsion systems at an early design stage. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 314. P. 119752. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119752>
2. Maloberti L., & Zaccone R. An environmentally sustainable energy management strategy for marine hybrid propulsion. *Energy*. 2025. Vol. 316. P. 134517. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134517>
3. Li Y., Ding Z., Yu Y., & Liu Y. Hybrid energy storage power allocation strategy based on parameter-optimized VMD algorithm for marine micro gas turbine power system. *Journal*



of *Energy Storage*. 2023. Vol. 73. P. 109189. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109189>

4. Ghimire P., Karimi S., Zadeh M., Nagalingam K. K., & Pedersen E. Model-based efficiency and emissions evaluation of a marine hybrid power system with load profile. *Electric Power Systems Research*. 2022. Vol. 212. P. 108530. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108530>

5. Korkmaz S. A., Erginer K. E., Yuksel O., Konur O., & Colpan C. O. Environmental and economic analyses of fuel cell and battery-based hybrid systems utilized as auxiliary power units on a chemical tanker vessel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48(60). Pp. 23279–23295. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.320>

6. Yao S., Yan X., Xia M., Wang C., & Wang S. Thermodynamic and economic analysis, optimization of SOFC/GT/SCO₂/ORC hybrid power systems for methanol reforming-powered ships with carbon capture. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025. Vol. 67. Pp. 105840. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105840>

7. Li C., Wang Z., Liu H., Guo F., Li C., Xiu X., Wang C., Qin J., & Wei L. Energy and configuration management strategy for solid oxide fuel cell/engine/battery hybrid power system with methanol on marine: A case study. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 307. P. 118355. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118355>

8. Hinić V., Radica G., Jurić Z., Lalić B., & Vidović T. Performance analysis of hybrid marine energy systems. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 83. Pp. 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.02.025>

9. Fang S., Chen D., & Fan X. Novel intelligent adaptive sliding mode control for marine fuel cell system via hybrid algorithm. *Energy and AI*. 2024. Vol. 19. P. 100464. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100464>

10. Melnyk O., Onyshchenko S. Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. *ISEM 2021, LNNS*. 2022. Vol. 463. Pp. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9

11. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 116. Pp. 223–235. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>

12. Onyshchenko S. P., Melnyk O. M., Voloshyn A. O., Kalinichenko Y. V., & Zaiats S. V. Overview of key mechanisms for managing energy efficiency and emission control from marine vessels. *Collection of Scientific Papers of Ukrainian State University of Railway Transport*. 2021. Vol. 197. Pp. 121–129. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248314>

13. Melnyk O. M., Shumylo O. M., Onishchenko O. A., Mykhailova Yu. V., Obniavko T. S., Korobko T. O. Kontseptsiia ta perspektyvy vykorystannia vodnevoho palyva v morskomu transporti. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu*. 2023. Vyp. 203. S. 96–105.

**Bulhakov M. P., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,
Melnyk O. M., Doctor of Engineering, Professor (Odessa National
Maritime University, Odesa)**

DEVELOPMENT OF ENERGY MODELS OF WIND AND SOLAR HYBRID ENERGY SYSTEMS ON MARINE VESSELS

This article presents the modeling and assessment of the energy efficiency of a hybrid energy system of a marine vessel, which combines traditional energy sources (diesel generators) with renewable energy sources such as solar panels and wind turbines. Based on mathematical models and simulations in the MATLAB/Simulink environment, the dynamics of energy consumption, battery charge/discharge modes, renewable energy generation and its impact on specific CO₂ emissions are analyzed. Analytical expressions for determining the integral fuel equivalent, load factor and total efficiency are proposed, which allow for scenario analysis and feasibility studies of hybrid systems. The simulation results confirm that hybridization allows for a fuel consumption reduction of up to 25%, as well as a reduction in CO₂ emissions, especially in peak solar power generation conditions. The described approach provides a platform for further optimization of ship power system configurations, taking into account real ship operation profiles and climatic conditions.

Keywords: hybrid power system; seagoing vessel; energy efficiency; simulation; fuel efficiency; MATLAB/Simulink; solar energy; diesel generator; CO₂ emissions; optimization; sustainable development; maritime transport.