

УДК 629.5.038.068:662.613.12

doi: 10.32620/aktt.2023.4.11

В. В. КОРОБКО, А. П. ШЕВЦОВ

Національний університет кораблебудування
імені адмірала С. О. Макарова, Миколаїв, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СУДНОВИХ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ З ПАЛИВНИМИ КОМІРКАМИ

Останнім часом в судновій енергетиці значного поширення отримали гібридні енергетичні установки, до складу яких, наряду з традиційними тепловими двигунами, входять електрохімічні енергогенеруючі системи, побудовані з використанням паливних комірок. Гібридні суднові енергетичні установки (СЕУ) – це відносно нове технічне рішення для морського флоту, поява якого зумовлена жорсткими вимогами міжнародних організацій щодо обмеження емісії шкідливих для довкілля речовин. В першу чергу – це так звані Green House Gas (GHG), а саме – оксиди вуглецю, метан, оксиди азоту, та інші сполуки. Проведений аналіз сучасного стану суднової енергетики та тенденцій її розвитку дозволив зробити висновок, що проблема полягає в робочих процесах теплових двигунів, які основані на згорянні палив. Забезпечити екологічну чистоту судноплавства можливо шляхом переходу до нових принципів виробництва механічної енергії, не основаних на хімічних процесах згорання палив. Паливні елементи, які генерують електричну енергію шляхом електрохімічних процесів, здатні кардинально вирішити цю проблему. Впровадження таких електрохімічних генераторів потребує методів системного підходу до розробки схемних рішень, які здатні забезпечити отримання синергетичного ефекту. Предмет дослідження – закономірності та параметри процесів енергообміну в гібридних СЕУ. В роботі розглядаються гібридні СЕУ з електрохімічними генераторами на основі протоннообмінних паливних комірок (PEM FC). Ефективна експлуатація гібридних СЕУ передбачає використання систем утилізації теплових викидів судового обладнання. Цей тип паливних комірок найбільш поширений в енергетиці та на транспорті. Робочі температури в PEM FC, в залежності від їх типу, лежать в діапазоні 60-80 °C або 120-200 °C, що є проблемою для створення ефективних систем утилізації скидної теплоти. Метою досліджень є розробка схем утилізації теплових викидів гібридних СЕУ з PEM FC, термоакустичними тепловими машинами. В роботі показано, що електрохімічні електрогенератори можуть бути інтегровані в теплову схему сучасних СЕУ, а застосування термоакустичних теплових машин розширює можливості систем утилізації теплових викидів. Низькотемпературні термоакустичні двигуни здатні перетворити теплові викиди систем PEM FC в механічну роботу, за рахунок чого підвищити загальну ефективність гібридної СЕУ на 8 – 15 %.

Ключові слова: Паливна комірка; PEM FC; гібридна енергетична установка; термоакустичні технології; утилізація теплових викидів.

Вступ

Мореплавство є важливою складовою світової економіки, що зумовлює необхідність швидкого реагування на потреби суспільства. Морська галузь має задовільнити зростаючі потреби суспільства в перевезенні вантажів, і при цьому відповідати жорстким вимогам ІМО щодо екологічності суден, в яких значна увага спрямована на обмеження емісії парникових газів, так званих GHG [1]. Можна бачити, що саме ці екологічні вимоги є причиною суттєвих концептуальних змін в суднобудуванні, конструкції суден та судновій енергетиці.

Запровадження ІМО індикативних показників – EEDI, EEXI – ставить задачі пошуку та нових інноваційних рішень, як для суден, що проектуються, так і для тих, що знаходяться в експлуатації [2].

Прикладом можуть стати сучасні «Retrofit» проекти, які передбачають глибоку модернізацію пропульсивного комплексу існуючих суден та їх енергетичної установки. Вдосконалення пропульсивного комплексу досягається встановленням енергозберігаючих пристроїв-насадок, так званих Energy Saving Devices (ESD) [3]. Зменшення буксирного опору суден досягають за рахунок «Air Lubrication» додаткових рушіїв, таких як «Flettner Rotors» жорсткі паруса та «Kite sail» пристрої.

Великі зміни відбуваються безпосередньо в складі суднових енергетичних установок (СЕУ). Так, при модернізації суден встановлюються системи очистки скидних газів ДВЗ від GHG, до яких належать CO₂, CO, NO_x, різні за складом VOL. Для нових суден та проектних розробок наявність такого обладнання є обов'язковою.

Дієвим методом зменшення емісії GHG, особливо окислів вуглецю, є використання альтернативних палив – метанолу, LNG та безвуглецевих палив, водню, або аміаку.

Характерною рисою суднової енергетики є постійний пошук нових інноваційних рішень, які можуть забезпечити суттєве покращення характеристик СЕУ та суден в цілому. Технічний прогрес, що був досягнутий в енергетиці, хімічних та електрохімічних технологіях, дав можливість в повній мірі реалізувати ідею синергетичного ефекту за рахунок використання в СЕУ різних методів отримання енергії.

На рис. 1 показана схема СЕУ, в основі якій покладена концепція фірми Wärtsilä «Advanced Energy Management» – (AEM), яка була розроблена ще в 2008 році. АЕМ передбачала використання на судні різних джерел енергії механічної та електричної, а саме ДВЗ, електродвигунів, валогенераторів, систему утилізації теплових викидів, акумуляторних батарей, та блоку паливних комірок.

Отже, присутні всі складові сучасної гібридної СЕУ, в тому разі інтегральна система контролю і управління потоками енергії.

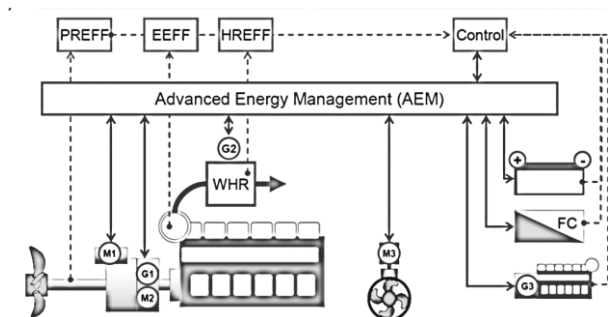


Рис. 1. Концепція енергетичного менеджменту

В подальшому, в роботі розглядаються саме такі – «повнокомплектні» гібридні установки, які споживають скраплені газові палива LNH₃ або LNG.

остановка задачі досліджень

Наявність електрохімічного генератора на основі паливних комірок виводить гібридну СЕУ на принципово вищий якісний рівень, який надає можливість провадження «по combustion» технології, та переходу до екологічних «Carbone Free» технологій.

В СЕУ теплові потоки від двигунів, головних та допоміжних, ПК, системи WHR об'єднані загальною тепловою схемою, що дає можливість більш ефективно утилізувати їх теплові викиди.

На поточний момент найбільш поширеними на практиці є ЕУ, в яких використовуються PEM FC –

«Proton Exchange Membrane Fuel Cells» [7]. В таблиці 1 наведені температури теплоносіїв елементів гібридної СЕУ, які використовуються судновими системами утилізації. Досягнення максимального ефекту від PEMFC генераторів можливо за умов їх включення в теплову схему СЕУ в найбільш раціональний спосіб.

Метою досліджень є розробка схем утилізації теплових викидів гібридних СЕУ з PEM FC, термоакустичними тепловими машинами. Розглядаються СЕУ, які споживають криогенні палива, LNG або

Існують два типи PEM FC, низькотемпературні LT PEMFC з робочими температурами 60 – 80 °С, та високотемпературні – HT PEM FC, які працюють при температурах 120 – 200 °С.

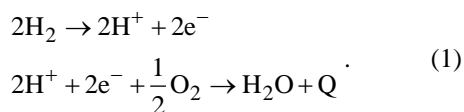
2. Теплові потоки гібридної СЕУ

В загальному випадку електрохімічний генератор на основі PEM FC можна розглядати, як елемент теплової схеми та джерело додаткових теплових потоків. В PEM-паливних комірках необхідно підтримувати їх робочу температуру в допустимих межах – 60-80 °С для низькотемпературних PEM-паливних елементів та 120-200 °С для високотемпературних PEM-паливних елементів.

Можна бачити, що теплові викиди ПК мають доволі низький температурний потенціал, але цілком прийнятний для застосування термоакустичних технологій.

Робочі процеси в PEM FC

Робота PEM FC (рис. 2), основана на процесах електрохімічного окислення водню в ході реакції:



В ході екзотермічної реакції електрохімічного окислення водню (1), відбувається зміна загальної ентальпії реагентів – H, яка дорівнює сумі виробленого теплового потоку – Q та генерованої електричної потужності – E_{el}.

Отже, у відповідності до другого закону термодинаміки, можемо записати, що

$$\frac{1}{2F} H \times n = Q + E_{el} = Q + U \times I \times n, \quad (2)$$

де F – число Фарадея, а n – число комірок.

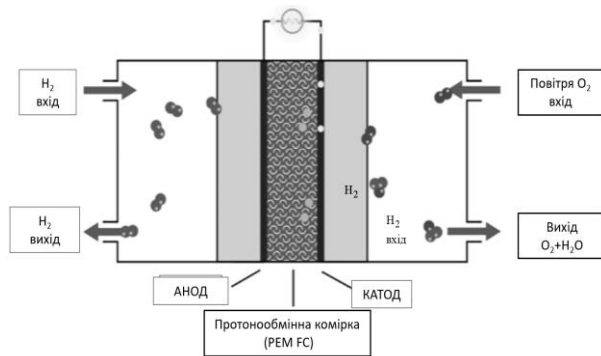


Рис. 2. Схема протоннообмінної паливної комірки

Генерація теплоти в PEM FC відбувається через ентропійне тепло реакцій (~35 % від загальної теплової енергії) і ряд незворотних процесів (~ 65 % від загальної теплової енергії), пов'язаних з перехідним проходженням водню, активацією електрохімічних реакцій, омичними опорами проти руху протонів (у мембранах) та електронів (у клітині та стеку), та масовим транспортом водню до аноду.

Максимальне значення напруги становить 1.48 В на основі нижчої теплоти згоряння водню (HHV), якщо продукт води вважається у рідкому вигляді:

$$\dot{Q}_{FC}^{HHV} = N \times i \times A_{cell} (1,48 - U_{cell}), \quad (3)$$

та 1,25 В, на основі вищої теплоти згоряння (LHV), якщо вода залишає стек у вигляді пари.

Варто відзначити, що на практиці частина тепла, що генерується паливним елементом, використовується для випаровування водного продукту всередині клітини під час роботи.

Тому, загальне теплове навантаження, рівняння (3), розраховується на основі нижчої теплоти згоряння, тоді, як охолодження стеку, рівняння (4), базується на вищій теплоті згоряння, враховуючи кількість тепла, необхідного для випаровування, переважно води, утвореної під час роботи [8, 9].

$$\dot{Q}_{FC}^{LHV} = N \times i \times A_{cell} (1,25 - U_{cell}), \quad (4)$$

де i – щільність току, (А/см²); A_{cell} – активна площа паливної комірки (см²); N – кількість комірок в стеку; U_{cell} – напруга однієї комірки.

Паливна комірка в умовах розімкнутого ланцюга видає напругу потенціалу Нернста – E_{Nernst} .

В разі підключення навантаження, напруга на клеммах комірки зменшується, оскільки присутні втрати потенціалу на подолання внутрішнього опору, а саме - втрати активації – ΔU_{act} ; омичного опору – ΔU_{ohm} , та концентраційний потенціал – ΔU_{trans} .

Таким чином, фактична напруга однієї комірки – ΔU_{trans} визначається за допомогою рівнянь (5) та (6) [8, 9].

$$U_{cell} = E_{Nernst} - \Delta U_{act} - \Delta U_{ohm} - \Delta U_{trans}, \quad (5)$$

$$U_{cell} = \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} (P_{O_2})^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \right] - \frac{RT}{2\alpha F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) - i r - \alpha_1 i^k \ln \left(1 - \frac{i}{i_L} \right), \quad (6)$$

де E_0 – електрорушійна сила; R – універсальна газова стала (8,314 кДж/(мольК)); T – температура стека (К); F – стала Фарадея (96485 Кл/моль); P_{H_2} , P_{O_2} та P_{H_2O} парціальні тиски водню, кисню та води відповідно (Н/м²); $\alpha \approx 0,5$ – коефіцієнт переносу заряду; r – питомий опір комірки (Ом/см²); α_1 – константа підсилення; k – константа масопереносу, i_L – гранична густина струму.

Діаграма потоків теплоти діючої PEM FC, рис. 3, показує, що в теплоту перетворюється 42,7 % енергії пального, 33,0 % скидної теплоти відводиться системою охолодження, а 7,2 % утилізується на внутрішні потреби циклу [9].



Рис. 3. Потoki теплоти в типовій PEM FC

Гібридна СЕУ

В гібридній СЕУ PEM FC використовуються в якості електрогенераторів і мають розглядатися, як

структурний елемент установки. За своїми параметрами PEM FC може бути інтегрована в теплову схему СЕУ, що забезпечить підвищення загальної ефективності всього енергетичного комплексу (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри теплоносіїв скидних теплових ресурсів елементів гібридних СЕУ

Теплоносій	МОД	СОД	РЕМFC
	Температура, К		
Відхідні гази ДВЗ	490 - 530	500 - 690	
Надувне повітря	400 - 490	380 - 470	
Рідина системи охолодження	355 - 360	360 - 370	(LT PEM) 333 - 363 (HT PEM) 450 - 493
LNG паливо	111	111	111
NH ₃ паливо	240	240	240

Діаграма на рис. 3 показує, що загальні теплові викиди PEM FC сягають 42 % від енергії спожитого палива, що цілком типово для паливних елементів даного типу, але ці викиди мають низький температурний рівень (див. табл. 1).

Відомо, що в судновій енергетиці існує надлишок низькотемпературних теплових викидів, при цьому бракує технологій їх перетворення в механічну роботу. В зв'язку з цим, доцільним є використання термоакустичних теплових машин в системі енергозбереження, для утилізації таких скидних ресурсів.

Термоакустичні технології

Для систем з низькотемпературними LT PEM FC найбільш раціональним рішенням є застосування термоакустичних двигунів (ТАД) з двофазним робочим тілом. Як показано в [10], використання ефектів фазового переходу в ТАД забезпечує їх роботу при низьких температурах – 85 – 90°C та сприяє зростанню їх питомої потужності. Для високотемпературних HT PEM FC можливі різні схемні рішення, прийнятні для конкретної СЕУ.

Як відомо, паливом для PEM FC є водень, який найбільш доцільно отримувати безпосередньо на судні шляхом парового риформінгу основного палива, в даному випадку скраплених газів.

В складі гібридної СЕУ з криогенними паливами термоакустична система регазифікації (рис. 4) дає можливість утилізувати цей потенціал і отримати додаткову механічну роботу. PEM FC в даному випадку є простим споживачем газового палива.

В системі регазифікації скраплених палив в якості нагрівачів передбачається використання блоку низькотемпературних ТАД. Споживачем акустичної енергії ТАД є турбогенератор з приводом від імпульсної двонаправленої турбіни [11].

До складу системи входять ємність з ЗПГ – 1; насоси – 2,3; компресор – 4; цистерна з прісною водою – 5; теплообмінник двигуна – 6; теплообмінники ТАД, нагрівач – 7 та охолоджувач – 8; матриця ТАД – 9. ЗПГ – зріджений природний газ, ГПГ – газовий стан природного газу, ТАД – термоакустичний двигун.

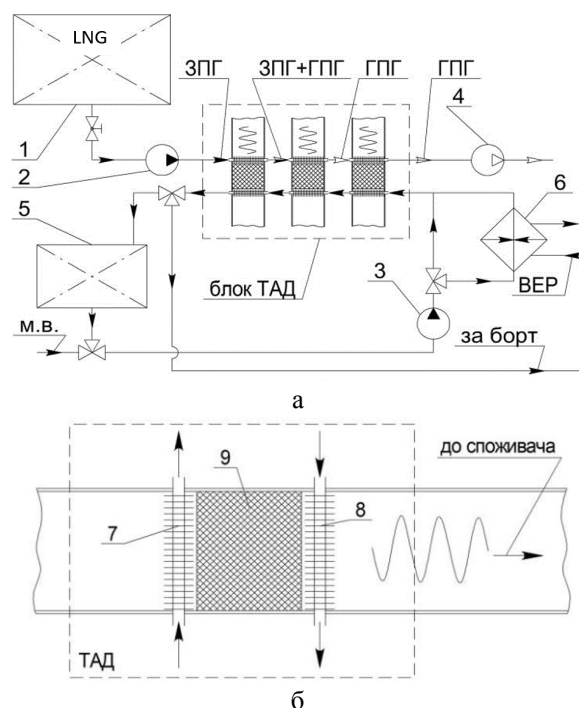


Рис. 4. Термоакустичної системи регазифікації скраплених палив:

а) – загальний вигляд системи, б) – схема ТАД

Важливо підкреслити, що така схема може бути задіяна для регазифікації скраплених газових палив з різними температурами, оскільки в ТАД в якості робочого тіла використовується гелій, що виключає можливі проблеми, пов'язані з криогенними температурами на поверхні внутрішніх теплообмінників (8).

Потрібний для роботи ТАД градієнт температур забезпечується завдяки різниці в температурі між рідиною системи охолодження ГД (355 – 360 К) – теплообмінник (7), та температурою LNG палива – теплообмінник (8). Завдяки внутрішній незворотності робочого процесу в ТАД температура скрапленого газу, який прокачується скрізь ТАД, буде підвищуватись.

В ТАД доцільно застосувати компактні випарні теплообмінники, які здатні використовувати теплоту випаровування рідини. Така термоакустична система

спроможна утилізувати теплоту різних джерел низькопотенційних викидів СЕУ – скидну теплоту систем охолодження ДВЗ, PEM FC та криогенний потенціал скраплених газів.

Результати розрахунку можливої потужності ТАД для різних джерел теплових викидів в СЕУ з МОД W12X92DF показані на рис. 5.

В даному випадку передбачалось використання декількох окремих ТАД для утилізації різних теплових викидів [11].

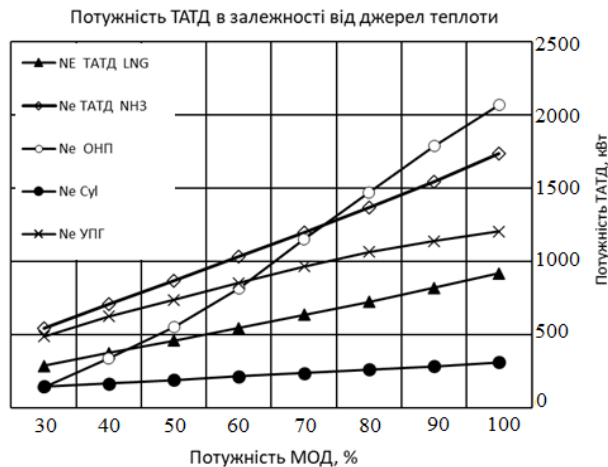


Рис. 5. Потенціал електричної енергії при використанні термоакустичної системи утилізації скидної теплоти в СЕУ

Такий підхід дає можливість отримати максимальну ефективність системи за рахунок використання температурних джерел з максимальною різницею температурних потенціалів.

Висновки

1. Використання електрохімічних генераторів на основі протонобмінних паливних елементів PEMFC в гібридних суднових та корабельних енергетичних установках суттєво покращує їх експлуатаційні характеристики, в тому разі їх екологічність.

2. Наявність в тепловій схемі СЕУ джерел енергії з температурами на рівні 60 – 120 °C суттєво полегшує експлуатацію НТ PEM FC, оскільки забезпечує умови для їх запуску без додаткових пристроїв.

3. Масогабаритні характеристики сучасних PEMFC електрогенераторів дозволяють інтегрувати їх до складу енергетичних установок існуючих суден або кораблів в процесі планового доковання.

4. Термоакустичні двигуни з двофазним робочим тілом можуть бути використані для утилізації теплових викидів LT PEM FC, з температурами 80 – 90 °C.

5. Розрахунки показали, що термоакустична система утилізації скидної теплоти НТ PEM FC

потужністю 1 МВт здатна забезпечити отримання 110 – 175 кВт електроенергії.

6. Використання PEM FC в судновій енергетиці дає можливість розробки ефективних схемних рішень з подальшим дослідженням ефективних умов їх використання.

7. Вдосконалення PEM FC можливо шляхом оптимізації процесів масо-енергообміну у внутрішніх порожнинах паливних комірок, а саме в електродних камерах та каналах охолоджуючих теплоносіїв.

Внесок авторів: розгляд стану та перспектив розвитку суднової енергетики, постановка задачі – **В. В. Коробко;** узагальнення результатів досліджень та формулювання висновків – **А. П. Шевцов.**

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. European Commission. 2020 Annual Report on CO₂ Emissions from Maritime Transport. – European Commission: Brussel, Belgium. – 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2022/06/2020-Annual-report-from-the-Commission.pdf>. – 10.03.2023.
2. Reduction Ship Emissions IMO EEXI & CII /SEEMP [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/news-room/ng-ship-emissions>. – 10.03.2023.
3. Mallouppas, G. Decarbonization in Shipping Industry: A Review of Research, Technology Development, and Innovation Proposals [Text] / G. Mallouppas, E. A. Yfantis // Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9, Iss. 4. – Article No. 415. DOI: 10.3390/jmse9040415.
4. Bordogna, G. Aerodynamics of wind-assisted ships: Interaction effects on the aerodynamic performance of multiple wind-propulsion systems [Електронний ресурс] / G. Bordogna. – Режим доступу: <https://doi.org/10.4233/uuid:96eda9cd-3163-4c6b-9b9f-e9fa329df071>. – 10.03.2023.
5. Advancements and prospects of thermal management and waste heat recovery of PEMFC [Text] / A. Baroutaji, A. Arjunan, M. Ramadan [et al.] // International Journal of Thermofluids. – 2021. – Vol. 9. – Article No. 100064. DOI: 10.1016/j.ijft.2021.100064.
6. A review of fuel cell systems for maritime applications [Text] / L. Biert, M. Godjevac, K. Visser, P. V. Aravind // Journal of Power Sources. – 2016. – Vol. 327. – P. 345–364. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.007.
7. Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives [Text] / H. Xing, C. Stuart, S. Spence, H. Chen // Sustainability. –

2021. – Vol. 3, Iss. 3. – Article No. 1213. DOI: 10.3390/su13031213.

8. High temperature PEM fuel cells [Text] / J. Zhang, Z. Xie, J. Zhang [et al.] // *Journal of Power Sources*. – 2006. – Vol. 160, Iss. 2. – P. 872–891. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.05.034.

9. Thermal Management of PEM Fuel Cells in Electric Vehicles [Text] / M. Nöst, C. Doppler, M. Klell, & A. Trattner // *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*. – 2017. – P. 93–112. DOI: 10.1007/978-3-319-57445-5_7.

10. Коробко, В. В. Експериментальні дослідження термоакустичних двигунів з двофазним робочим тілом [Текст] / В. В. Коробко, А. П. Шевцов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 4 (спец. вип. 1) (181). – С. 87–93. DOI: 10.32620/aktt.2022.4sup1.12

11. Дослідження роботи імпульсної двонаправленої турбіни в резонаторі термоакустичного двигуна [Текст] / В. В. Коробко, О. О. Московко, Г. Б. Мостипаненко, С. І. Сербін // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2017. – №8(143). – С. 19–25.

12. Коробко, В. В. Підвищення ефективності енергетичних установок шляхом застосування термоакустичних технологій [Текст] / В. В. Коробко // *Shipbuilding & marine infrastructure*. – Миколаїв : НУК, 2018. – № 2 (10). – С. 252–261.

References

1. European Commission. 2020 Annual Report on CO₂ Emissions from Maritime Transport. European Commission: Brussel, Belgium, 2021. Available at: <https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2022/06/2020-Annual-report-from-the-Commission.pdf>. (accessed 10.03.2023).

2. Reduction Ship Emissions IMO EEXI & CII /SEEMP. Available at: <https://marine-offshore.bureau-veritas.com/newsroom/ng-ship-emissions>. (accessed 10/03/2023).

3. Mallouppas, G. & Yfantis, E. A. Decarbonization in Shipping Industry: A Review of Research, Technology Development, and Innovation Proposals. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, vol. 9, iss. 4, article no. 415. DOI: 10.3390/jmse9040415.

4. Bordogna, G. Aerodynamics of wind-assisted ships: Interaction effects on the aerodynamic performance of multiple wind-propulsion systems. Available at:

<https://doi.org/10.4233/uuid:96eda9cd-3163-4c6b-9b9f-e9fa329df071>. (accessed 10/03/2023).

5. Baroutaji, A., Arjunan, A., Ramadan, M., Robinson, J., Alaswad, A., Abdelkareem, M. A. & Olabi, A.-G. Advancements and prospects of thermal management and waste heat recovery of PEMFC. *International Journal of Thermofluids*, 2021, vol. 9, article no. 100064. DOI: 10.1016/j.ijft.2021.100064.

6. Biert, L., Godjevac, M., Visser, K. & Aravind, P. V. A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 2016, vol. 327, pp. 345–364. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.007.

7. Xing, H., Stuart, C., Spence, S. & Chen, H. Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives. *Sustainability*, 2021, vol. 13, iss. 3, article no. 1213. DOI: 10.3390/su13031213.

8. Zhang, J., Xie, Z., Zhang, J., Tang, Y., Song, C., Navessin, T. & Holdcroft, S. High temperature PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2006, vol. 160, iss. 2, pp. 872–891. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.05.034.

9. Nöst, M., Doppler, C., Klell, M., & Trattner, A. Thermal Management of PEM Fuel Cells in Electric Vehicles. *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*, 2017, pp. 93–112. DOI: 10.1007/978-3-319-57445-5_7.

10. Korobko, V. V. & Shevcov, A. P. Експериментальні дослідження термоакустичних двигунів з двофазним робочим тілом [Features thermoacoustic thermal machines using low-temperature thermal energy source]. *Авіаційно-космічна техніка і технологія – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 4sup1 (181), pp.87–93. DOI: 10.32620/aktt.2022.4sup1.12

11. Коробко, В. В., Московко, О. О., Мостипаненко, Г. Б. & Сербін, С. І., Дослідження роботи імпульсної двонаправленої турбіни в резонаторі термоакустичного двигуна [Investigation of the operation of the pulse bi-directional turbine in the resonator of the thermoacoustic engine]. *Авіаційно-космічна техніка і технологія – Aerospace technic and technology*, 2017, no. 8(143), pp. 19–25.

12. Коробко, В. В. Підвищення ефективності енергетичних установок шляхом застосування термоакустичних технологій [Improvement of Efficiency of Power Plants by Applying Thermoacoustic Technologies]. *Судостроєння у морській інфраструктурі – Shipbuilding & marine infrastructure*, Nykolaev, NUK, 2018, no. 2 (10), pp. 252–261.

UTILIZING THERMOACOUSTIC TECHNOLOGIES IN MARINE HYBRID POWER PLANTS WITH FUEL CELLS

Volodymyr Korobko, Anatoliy Shevtsov

Recently, hybrid power plants have gained significant popularity in marine energy systems. These power plants, in addition to traditional thermal engines, include electrochemical power generation systems based on fuel cells. Hybrid marine power plants represent a relatively new technical solution for the maritime fleet, driven by strict environmental emission regulations imposed by international organizations. These regulations primarily target greenhouse gas (GHG) emissions, such as carbon oxides, methane, nitrogen oxides, and other compounds. An analysis of the current state of marine energy and its development trends concludes that the problem lies in the working processes of thermal engines, which are based on fuel combustion. Achieving ecological cleanliness in maritime transport is possible by transitioning to new principles of mechanical energy production that do not rely on chemical fuel combustion. Fuel cells, which generate electricity through electrochemical processes, have the potential to solve this problem. However, the implementation of such electrochemical generators requires a systematic approach to the development of schematic solutions capable of achieving a synergistic effect. The subject of the research is the regularities and parameters of energy exchange processes in hybrid power plants. This study focuses on hybrid power plants with electrochemical generators based on proton exchange membrane fuel cells (PEM FC). The effective operation of hybrid power plants involves the utilization of waste heat from ship equipment. PEM FC is the most widely used type of fuel cell in energy and transportation sectors. The operating temperatures of PEM FCs, depending on their type, range from 60 to 80 °C or 120 to 200 °C, which poses a challenge for the development of efficient waste heat utilization systems. The aim of the research is to develop waste heat utilization schemes for hybrid power plants with PEM FCs using thermoacoustic heat engines. The study establishes that electrochemical generators can be integrated into the thermal system of modern power plants, and the application of thermoacoustic heat engines expands the potential of waste heat utilization systems. Low-temperature thermoacoustic engines have the capability to convert waste heat generated by PEM FC systems into mechanical work, thereby increasing the overall efficiency of hybrid power plants by 8 to 15 %.

Keywords: fuel cell; PEM FC; hybrid power plant; thermoacoustic technologies; waste heat recovery.

Коробко Володимир Владиславович – д-р техн. наук, доц. каф. експлуатації суднових енергетичних установок та енергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала С. О. Макарова, Миколаїв, Україна.

Шевцов Анатолій Павлович – д-р техн. наук, проф., Освітньо-науковий центр морської інфраструктури, Національний університет кораблебудування імені адмірала С. О. Макарова, Миколаїв, Україна.

Volodymyr Korobko – Doctor of Tech. Sciences, Associate Professor, The Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Associate Professor of the Department of Operation of Ship Power Plants and Heat Power Engineering, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5761-6824, Scopus Author ID: 54420455300.

Anatoliy Shevtsov – Doctor of Tech. Sciences, Professor, Educational and Scientific Center of Marine Infrastructure, The Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: aootnet@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8692-6458.