



**Nikolay
V. Washchilenko**
Ващенко
Микола
Васильович

УДК 621.45.034

MARINE HYBRID ENERGY SYSTEM WITH SOLID OXIDE FUEL CELLS AND GAS TURBINE

СУДНОВА ГІБРИДНА ЕНЕРГЕТИЧНА СИСТЕМА З ТВЕРДООКСИДНИМИ ПАЛИВНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ТА ГАЗОВОЮ ТУРБІНОЮ

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2022.1\(17\).02](https://doi.org/10.15589/smi2022.1(17).02)



**Serhiy
I. Serbin**
Сербін Сергій
Іванович

Serhiy I. Serbin

Сербін Сергій Іванович,
докт. техн. наук, професор
serhiy.serbin@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3423-2681

Oleksii V. Patlaichuk

Патлайчук Олексій Володимирович,
магістр
alexpatlaichuk@gmail.com
ORCID: 0009-0008-0887-1173



**Oleksii
V. Patlaichuk**
Патлайчук
Олексій
Володимирович

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв

Abstract. The article is devoted to the development of decarbonized marine power systems, consisting of solid oxide fuel cells and a gas turbine, with practically zero emissions of environmentally harmful components. Currently, there is a growing interest in the use of fuel cells as part of marine hybrid systems. In fuel cells, energy conversion is a direct electrochemical process without intermediate conversion of chemical fuel energy into thermal energy. Thus, fuel cells are not subject to the limitation of the Carnot cycle. One of the types of such elements is a solid oxide fuel cell (SOFC), in which the operating temperature is about 873-1373 K. This makes it possible to practically use SOFC together with a gas turbine (GT) for the production of electric and thermal energy in hybrid cycles (SOFC-GT). The aim of the work is to increase the efficiency of the marine hybrid system for the production of electrical and thermal energy, consisting of solid oxide fuel cells and a gas turbine with over-expansion. In contrast to previous studies, the promising use of the gas turbine cycle with the injection of steam into the combustion chamber and the over-expansion turbine for the utilization of the heat of the waste gases of the fuel cells, as well as increasing the efficiency of the power system, has been proven. The multi-mode nature of marine power plants determines the great potential of using a complex of solid oxide fuel cells and a gas turbine to increase the efficiency of the entire ship's operation. A design scheme of a marine power plant with solid oxide fuel cells and a gas turbine with over-expansion has been developed. Thermal calculations of the efficiency of such a system were carried out. The obtained results determined scientifically based directions for the creation of promising energy systems with fuel cells and gas turbines, expanded the understanding of the processes that determine the processes of energy conversion in such systems. This will make it possible to create highly efficient decarbonized energy systems for marine and stationary purposes in Ukraine in the future.

Key words: hybrid energy system; solid oxide fuel cell; gas turbine; electrical station.

Анотація. Стаття присвячена розробці декарбонізованих суднових енергетичних систем, що складаються з твердооксидних паливних елементів та газової турбіни, з практично нульовими викидами екологічно шкідливих компонентів. Нині має місце зростаючий інтерес до використання паливних елементів у складі суднових гібридних систем. У паливних елементах перетворення енергії є прямим електрохімічним процесом без проміжного перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію. Таким чином, паливні елементи не підлягають обмеженню циклу Карно. Одним з видів таких елементів є твердооксидний паливний елемент (solid oxide fuel cell – SOFC), в якому робоча температура становить близько 873–1373 К. Це дозволяє практично застосовувати SOFC разом з газовою турбіною (gas turbine – GT) для виробництва електричної та теплової енергії у гібридних циклах (SOFC-GT). Метою роботи є підвищення ефективності суднової гібридної системи для виробництва електричної та теплової енергії, що складається з твердооксидних паливних елементів і газової турбіни з перерозширенням. На відміну від попередніх досліджень, доведена перспективність використання газотурбінного циклу з впорскуванням водяної пари в камеру згоряння та турбіною перерозширення для утилізації теплоти відхідних газів паливних елементів, а також підвищення ефективності енергосистеми. Багаторежимність суднових енергетичних установок визначає велику потенційну можливість використання комплексу твердооксидних паливних елементів та газової турбіни для підвищення ефективності експлуатації всього судна. Розроблено схему суднової енергетичної установки з твердооксидними паливними елементами і газовою турбіною з перерозширенням. Проведено теплові розрахунки ефективності такої системи. Отримані результати визначили науково обґрунтовані напрями створення перспективних енергетичних систем з паливними елементами та газовими турбінами, розширили уявлення про процеси, які зумовлюють процеси перетворення енергії в таких системах. Це дасть змогу в перспективі створити в Україні вискоелективні декарбонізовані енергетичні системи суднового та стаціонарного призначення.

Ключові слова: гібридна енергетична система; твердооксидний паливний елемент; газова турбіна; електростанція.

References

- [1] Faleh, S., Khir, T. (2022). SOFC-Gas Turbine Hybrid Power Plant: Exergetic Study. *Rotating Machines*. Edited by Y. Li., 16 p.
- [2] U.S. Department of Transportation. (2019) Prototype Design and Evaluation of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine Systems for Use in Locomotives. Office of Research, Development and Technology Washington, DC 20590, DOT/FRA/ORD-19/43, 114 p.
- [3] Wang, Z., Chen, H., Xia, R., Han, F., Ji, Y., Cai, W. (2022). Energy, exergy and economy (3E) investigation of a SOFC-GT-ORC waste heat recovery system for green power ships. *Thermal Science and Engineering Progress*. Vol. 32, 101342.
- [4] Wilson, J.A., Wang, Y., Carroll, J., Raush, J., Arkenberg, G., Dogdibegovic, E., Swartz, S., Daggett, D., Singhal, S., Zhou, X.D. (2022). Hybrid Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Model Development for Electric Aviation. *Energies*, Vol. 15, 2885.
- [5] McPhail, S.J., Leto, L., Boigues-Muñoz, C. (2013). The Yellow Pages of SOFC Technology, International Status of SOFC Deployment 2012–2013, IEA Implementing Agreement Advanced Fuel Cells, Annex 24 – SOFC. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/311869822_The_Yellow_Pages_of_SOFC_Technology_International_Status_of_SOFC_deployment_2012-2013.
- [6] National Fuel Cell Research Center. Hybrid Fuel Cell / Gas Turbine Systems. (2015) Retrieved from: http://www.nfrcr.uci.edu/PDF_Research_Summaries/HYBRIDfuelCELL_GASTurbineSystems-Analyse-sHybridFuelCellGasTurbineSystems.pdf.
- [7] Saisirirata, P. (2015). The Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) and Gas Turbine (GT) Hybrid System Numerical Model. *Energy Procedia*. Vol. 79, pp. 845–850.
- [8] De La Cruz, C.T.C., Herz, G., Reichelt, E., Jahn, M. (2020). Modelling of a Novel Atmospheric SOFC/GT Hybrid Process and Comparison with State-of-the-Art SOFC System Concepts. *Fuel Cells*. Vol. 20, No. 5, pp. 608–623.

- [9] Duong, P.A., Ryu, B., Kim, C., Lee, J., Kang, H. (2022). Energy and Exergy Analysis of an Ammonia Fuel Cell Integrated System for Marine Vessels. *Energies*. Vol. 15, 3331.
- [10] Lao, X.S., Ma, C. (2021). Performance Analysis of SOFC/GT Combined Cycle System with Preheater Arranged after the Turbine. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 701, 012047.
- [11] Zhang, B., Maloney, D., Harun, N.F., Zhou, N., Pezzini, P., Medam, A., Hovsopian, R., Bayham, S., Tucker, D. (2022). Rapid Load Transition for Integrated Solid Oxide Fuel Cell – Gas Turbine (SOFC-GT) Energy Systems: A Demonstration of the Potential for Grid Response. *Energy Conversion and Management*. Vol. 258, No. 15, 115544.
- [12] Serbin, S., Washchilenko, N., Cherednichenko, O., Dzida, M., Chen, D. (2022). Application analysis of a hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine system for marine power plants. *Ships and Offshore Structures*. Vol. 17, No. 4, pp. 866–876.
- [13] Bakalis, D.P. (2014). Turbomachinery Analysis and Design for Hybrid SOFC-GT Systems Optimized Performance. PhD thesis. University of Thessaly, 171 p.

Постановка завдання. На сучасному етапі основні зусилля в галузі енергомашинобудування спрямовані на підвищення енергоефективності виробництва, передачі і використання енергії, а також на декарбонізацію енергетичних систем, у тому числі суднових. Це можливо лише за умови інноваційного розвитку на основі досягнень фундаментальної науки, створення і впровадження нових ефективних, більш надійних і довговічних матеріалів, обладнання та технологій.

Одним з актуальних напрямів вирішення проблем забезпечення електричною енергією споживачів у різних, у тому числі і складних умовах, є паливні елементи, в яких хімічна енергія палива безпосередньо перетворюється на електроенергію. Твердооксидні паливні елементи (SOFC) мають досить широкий діапазон застосування: від портативних джерел струму (10–500 Вт) до автономних стаціонарних електростанцій (1–10 МВт). Їх привабливість зумовлена насамперед високою ефективністю прямого перетворення хімічної енергії палива на електрику. При цьому паливом у принципі можуть служити будь-які вуглеводні, а окиснювачем – повітря. Причому низькотемпературне електрохімічне згоряння палива забезпечує високу екологічність процесу отримання електроенергії.

Високі робочі температури (873–1373 K) дозволяють застосовувати SOFC разом з газовою турбіною для виробництва електричної та теплової енергії у гібридних

циклах. Ці гібридні цикли будуть конкурентоспроможними з традиційними гібридними циклами, що містять газову турбіну та котел-утилізатор, оскільки їх електрична ефективність становить 60–70% і навіть більше.

Можна виділити такі галузі застосування SOFC-GT систем у судновій енергетиці.

1. Приводи суднових рушіїв, допоміжні енергетичні установки.
2. Установки, в яких параметри потужності постійно змінюються: приводи буксирування; паромні судна; судна постачання для морської нафтової та газової промисловості.
3. Підводні човни.
4. Комерційні транспортні судна: танкери; вантажні перевезення; контейнерні перевезення; круїзні судна.
5. Енергетичні установки кораблів.
6. Аварійні джерела енергії.
7. Інші сфери застосування: офшорні платформи; енергозабезпечення систем дистанційної навігації, радіолокаційних чи океанографічних даних та систем передачі даних.

Відзначимо, що майбутнє екологічно чистих суден розглядається у безпосередньому зв'язку з удосконаленням декарбонізованих систем з паливними елементами і газовими турбінами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ідея гібридної енергетичної системи полягає в тому, щоб термодинамічно зв'язати газову турбіну з паливними елементами,

причому їх відхідні гази є джерелом теплоти для турбінної частини [1–4].

SOFC-GT системи мають унікальну ефективність, яка мало залежить від масштабу і може досягати 60% і вище навіть у разі потужності установки 1 кВт [5]. Це дозволяє використовувати їх у різних енергетичних системах (у тому числі і суднових) у широкому діапазоні потужностей та навантажень. Як приклад, компанія Siemens Westinghouse розробила гібридну систему потужністю 220 кВт типу SOFC-GT, що використовує трубчасту конструкцію SOFC. Система була спроектована, побудована та випробувана для демонстрації і доведення гібридної схеми з терміном дії 3000 годин у Національному дослідницькому центрі паливних елементів Каліфорнійського університету [6].

Низка робіт спрямована на аналіз конфігурацій гібридних систем, визначення ефективності перетворення енергії. Декілька схем комбінованих та гібридних циклів, які відрізнялися способами нагріву палива та окиснювача, проаналізовано в [7]. Розрахункова ефективність циклу не перевищувала 58%. В роботі [8] запропоновано нову концепцію гібридної системи на атмосферних твердооксидних паливних елементах із застосуванням газової турбіни. Двоступенева система паливних елементів дозволила досягнути ефективності більш ніж 60%. Відзначимо, що резервом підвищення ефективності розглянутих у цих роботах систем може бути підвищення температури газу перед турбіною, яке досягається більш ефективним допалюванням відхідних газів паливних елементів.

У роботі [9] представлено інтегровану систему, яка містить твердооксидний паливний елемент, газову турбіну, парову турбіну та утилізаційний парогенератор, в якій використано аміак як перспективне паливо для цілей декарбонізації. Для системи комбінованого циклу SOFC-GT з додатковим нагрівачем, розташованим після турбіни, в роботі [10] розроблено термодинамічну модель. Досліджено характеристики системи комбінованого циклу на низько- і середньотемпературних паливних елементах. У

роботі [11] розглянуто ефективні стратегії контролю навантаження модуля SOFC-GT для виявлення динамічних характеристик.

Проведений аналіз наявної літератури показав, що системи SOFC-GT, що працюють у разі відносно невеликого тиску, є перспективними як з точки зору ефективності системи загалом, так і з точки зору надійності і довговічності і можуть бути рекомендовані для суднового використання як джерела електроенергії і теплоти. Специфічні вимоги до суднової потужності та деякі технічні бар'єри обмежують застосування паливних елементів на суднах [1; 3]. Паливні елементи великої потужності все ще перебувають на етапах дослідних робіт або демонстрації, оскільки наявні такі проблеми: а) складність системи зберігання водню; б) необхідність використання традиційних видів палива; в) висока вартість системи; г) потреба в ефективних каталізаторах; г) недостатній ресурс паливних елементів. Тому натеper низка дослідних проєктів зосереджені на SOFC, який поєднується з паливним риформером, що використовує класичне паливо: рідке або газоподібне (природний газ).

Виокремлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень та напрямів використання суднових систем SOFC-GT показав, що наявні невирішені питання, які пов'язані як з особливостями експлуатації енергетичних установок на суднах, недосконалістю робочих процесів у самих паливних елементах у роботі на різних паливах, так і з недостатньою проробкою теплових схем енергетичного комплексу SOFC-GT стосовно підвищення утилізації теплоти відпрацьованих газів паливних елементів у газотурбінному контурі.

У цій статті з науково-практичної точки зору розраховується ефективність запропонованої авторами теплової схеми суднової SOFC-GT електростанції, причому газотурбінний агрегат працює за так званим контактним термодинамічним циклом (з впорскуванням перегрітої пари в камеру згоряння) з турбіною перерозширення.

Метою роботи є підвищення ефективності суднової гібридної системи для вироб-

ництва електричної та теплової енергії, що складається з твердооксидних паливних елементів і газової турбіни з перерозширенням.

Об'єктом дослідження вибрано термодинамічні процеси у судновій гібридній системі для виробництва електричної та теплової енергії. **Предмет дослідження** – закономірності процесів перетворення енергії у судновій SOFC-GT системі у разі використання газотурбінного агрегату контактного типу.

Виклад основного матеріалу. Автори пропонують схему перспективної суднової електростанції, яка використовує стеки твер-

дооксидних паливних елементів, а також контактний газотурбінний агрегат (КГТА), що працює з перерозширенням (рис. 1), на відміну від раніше розглянутої схеми з регенеративною газовою турбіною [12].

Для енергетичного комплексу SOFC-GT, що розглядається, прийнята складна схема газотурбінної частини, в якій реалізується цикл КГТА, що працює з перерозширенням. Така схема, як показано нижче, дозволяє знизити до мінімальних значень величину тиску в корпусах стеків твердооксидних паливних елементів.

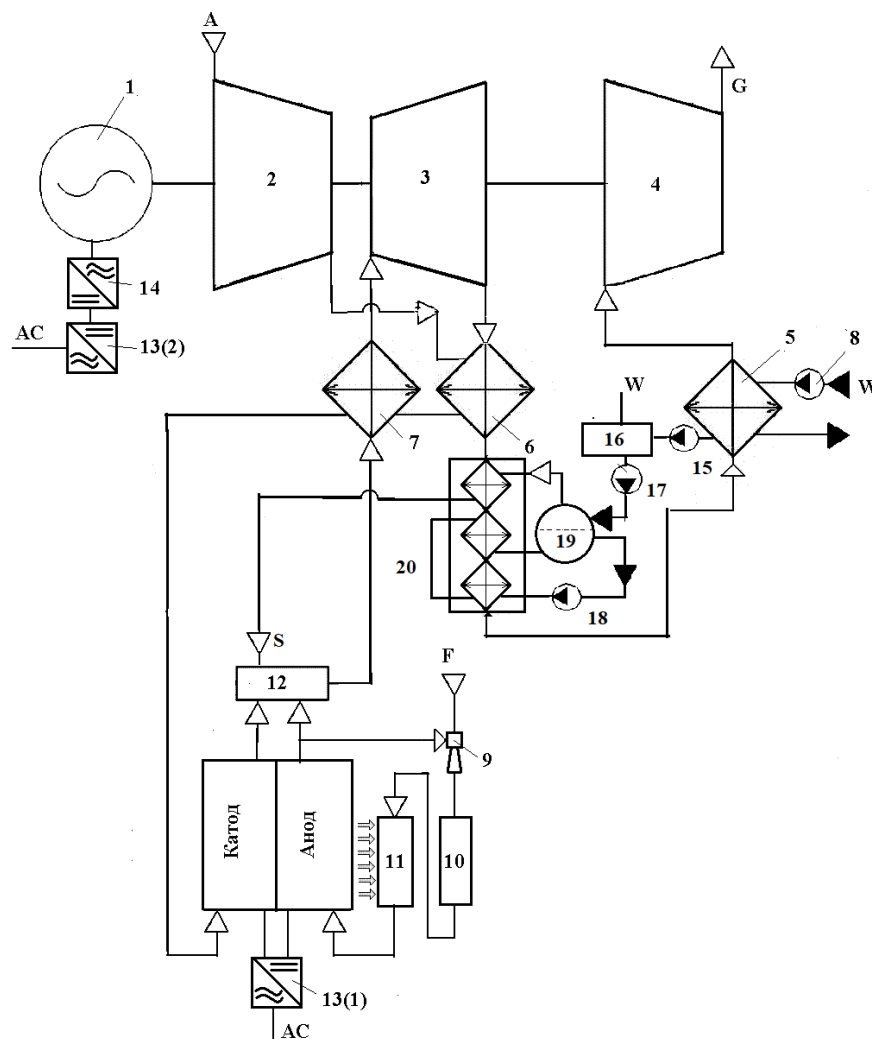


Рис. 1. Схема суднової гібридної електростанції: 1 – електрогенератор; 2 – компресор; 3 – турбіна; 4 – екстаузер; 5 – кінцевий газоохолоджувач-конденсатор (КГОК); 6 – повітропідігрівач першого ступеня (ППП1); 7 – повітропідігрівач другого ступеня (ППП2); 8 – насос охолоджувальної води; 9 – ежектор подачі газу; 10 – попередній риформер; 11 – вбудований риформер; 12 – камера згоряння (КЗ); 13(1), 13(2) – інвертор (постійний-змінний струм); 14 – інвертор (змінний-постійний струм); 15 – конденсатний насос; 16 – цистерна живильної води; 17 – живильний насос утилізаційного парогенератора (УПГ); 18 – циркуляційний насос УПГ; 19 – сепаратор пари УПГ; 20 – УПГ; А – атмосферне повітря; G – відхідні гази; F – подача палива; S – перегріта водяна пара

Атмосферне повітря компресором 2 стискається до розрахункового значення і проходить через повітропідігрівач першого ступеня 6, в якому попередньо нагрівається відхідними газами турбіни 3, яка приводить у обертання компресор 2, ексгаустер 4, а надлишок потужності віддає на електрогенератор 1. Після повітропідігрівача першого ступеня циклове повітря надходить у повітропідігрівач другого ступеня 7 і нагрівається до заданої температури на вході в катоди комірок SOFC газами, що виходять з камери згоряння 12. Паливом для КЗ 12 служить суміш газів на виході з анодів комірок SOFC, яка спалюється у збідненому киснем повітрі, що надходять у КЗ з катодів комірок SOFC.

Охолоджені до певної температури продукти згоряння після повітроперегрівача 7 надходять у турбіну 3, де розширюються до тиску істотно нижче атмосферного, рівень якого визначається прийнятним значенням ступеня підвищення тиску в ексгаустері 4. Далі вихлопні гази після турбіни 3 проходять по каналах газової сторони повітропідігрівача першого ступеня 6 та надходять в УПГ 20, який генерує перегріту водяну пару, що подається в КЗ 12.

Після УПГ газопарова суміш надходить у кінцевий газоохолоджувач-конденсатор 5, де охолоджується водою до розрахункової величини, при цьому більша частина водяної пари зі складу газопарової суміші конденсується і насосом 15 подається в цистерну котлової води 16, з якої насосом 17 далі подається у сепаратор 19 УПГ. Охолоджені та зневоднені продукти згоряння стискуються в ексгаустері 4 і викидаються в атмосферу.

У табл. 1 представлено параметри стеку SOFC [13], розробленого фірмою Siemens Westinghouse, які були використано у розрахунках судової гібридної електростанції.

Особливість математичної моделі газотурбінної частини гібридної схеми електростанції зі стеками SOFC та КГТА з двигуном, що працює з перерозширенням, полягає в тому, що ми не можемо призначити, як зазвичай прийнято у проектуванні ГТД, величину температури газопарової суміші перед турбіною. У запропонованій схемі значення цього параметра буде залежати від температури за повітропідігрівачем другого ступеня

Таблиця 1. Параметри стеку SOFC [13]

Параметр	Значення
Загальна робоча площа стеку (1152 елементів), м ²	96,1
Електрична потужність стеку, кВт	146,5
ККД перетворення струму інверторами, %	96
ККД стеку, %	46,24
Номінальна напруга в комірі стеку, В	0,68
Витрата палива (природний газ), г/с	7,2
Коефіцієнт використання палива	0,85
Теплові втрати енергії у стеку, %	2
Витрата повітря на вході у стек, кг/с	0,303
Загальні втрати повного тиску в стеку, %	4
Робоча температура комірки стеку, К	1183
Робочий тиск у комірі стеку, МПа	0,348
Температура повітря на вході у катод, К	1053

ПП2, коефіцієнта використання палива у стеках паливних елементів, міри підвищення тиску повітря у компресорі ГТД, кількості перегрітої пари, що генерує УПГ.

У такому разі температура газопарової суміші на вході в турбіну КГТА визначиться таким чином:

$$T_{3T} = T_{CC} - \frac{c_{p3A} \cdot (T_{1S} - T_{2AH1})}{\left(1 + \frac{1}{\alpha \cdot L_0} + g_{SS}\right) \cdot c_{p3GS}}$$

де c_{p3A} , c_{p3GS} – середні масові ізобарні теплоємності повітря та газопарової суміші для процесів теплообміну в ПП2; T_{1S} – температура повітря на виході з ПП2; T_{CC} – температура газопарової суміші на виході з КЗ; T_{2AH1} – температура повітря на виході з ПП1; α – коефіцієнт надлишку повітря; L_0 – стехіометрична кількість повітря; g_{SS} – відносна паропроductивність УПГ по перегрітій водяній парі.

Ефективність запропонованої схеми оцінюється таким чином.

Розрахункова потужність компресора на один стек SOFC:

$$N_C = G_C \cdot c_{pC} \cdot \Delta T_C,$$

де G_C – масова витрата повітря на вході в компресор; c_{pC} – середня масова ізобарна теплоємність повітря для процесу в компресорі; ΔT_C – дійсний підігрів повітря для політропного процесу в компресорі.

Розрахункова потужність турбіни на один стек SOFC:

$$N_T = G_C \cdot \beta_T \cdot c_{p,GT} \cdot \Delta T_T,$$

де β_T – коефіцієнт витрати турбіни; $c_{p,GT}$ – середня масова ізобарна теплоємність газо-

парової суміші для процесу в турбіні; $\varnothing T_T$ – дійсний температурний перепад на турбіну для політропного процесу.

Розрахункова потужність ексгаустера на один стек SOFC:

$$N_{Ex} = G_C \cdot \beta_{Ex} \cdot c_{p,gsEx} \cdot \Delta T_{Ex},$$

де β_{Ex} – коефіцієнт витрати ексгаустера; $c_{p,gsEx}$ – середня масова ізобарна теплоємність газопарової суміші для процесу в ексгаустері; $\varnothing T_{Ex}$ – дійсний підігрів газопарової суміші для політропного процесу в ексгаустері.

Електрична потужність газотурбінної частини гібридної схеми SOFC-GT на один стек:

$$N_{GT} = (N_T - N_C - N_E) \cdot \eta_r \cdot \eta_g \cdot \eta_{inv},$$

де η_r , η_g , η_{inv} – ККД редуктора, електрогенератора та інвертора відповідно.

Електрична потужність стеку SOFC-GT:

$$N_{\Sigma} = N_{SOFC} + N_{GT}.$$

Питома витрата палива для стеку SOFC-GT:

$$C_N = 3600 \cdot G_F / (N_{\Sigma} - N_{PWC}),$$

де G_F – масова витрата палива, що подається до стеку SOFC; N_{PWC} – потужність приводу насоса охолоджуючої води, що прокачується через КГОК.

Електричний ККД стеку SOFC-GT

$$\eta_{\Sigma} = 3600 / (C_N \cdot H_u),$$

де H_u – нижча теплотворна здатність палива.

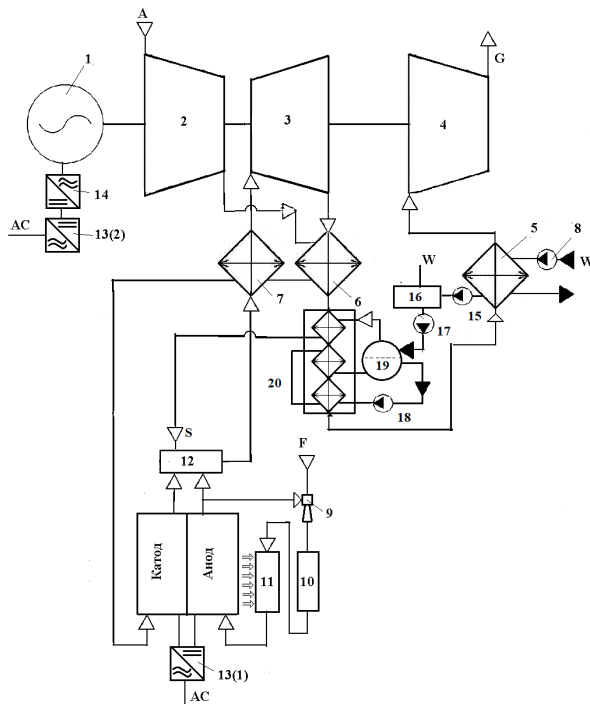


Рис. 2. Залежності ефективного ККД гібридної схеми електростанції від міри підвищення тиску повітря в компресорі

Обговорення результатів. На рис. 2 представлено залежності ефективного ККД гібридної схеми SOFC-GT від міри підвищення тиску повітря в компресорі ГТД π_c для низки значень міри підвищення тиску газу в ексгаустері π_{Ex} .

Як видно з графіків рис. 2, оптимальні значення міри підвищення тиску в компресорі ГТД для запропонованої схеми КГТА з турбіною перерозширення досить великі та, як показують виконані розрахунки, становлять $\pi_c = 15-16$ для рівнів температури газопарової суміші перед турбіною T_{3T} , що представлені на графіках рис. 3. З огляду на те, що компресор для ГТД потужністю 200–600 кВт раціональніше виготовляти одноступінчастим відцентровим і його міра підвищення тиску не може бути більше 6–8, подальші графічні залежності представлені для інтервалу значень $\pi_c = 5-10$.

Графіки рис. 2 вказують, що вплив міри підвищення тиску в ексгаустері ГТА π_{Ex} на ККД теплової схеми незначний, особливо в ділянці оптимальних значень міри підвищення тиску в компресорі, і може прийматися на рівні 1,3–1,4.

Розрахунки показують, що температура газопарової суміші перед турбіною ГТД у діапазоні параметрів, що розглядається, змінюється в інтервалі 940–1040 К, зростаючи зі збільшенням міри підвищення тиску в компресорі ГТД, що пояснюється збільшенням температури повітря на вході в повітропідігрівач другого ступеня (рис. 3).

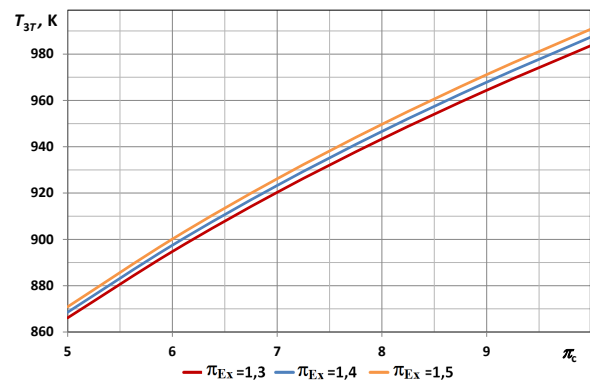


Рис. 3. Температура газопарової суміші перед турбіною для схеми SOFC-GT

Робота камери згоряння, у якій реагують залишкові горючі продукти риформінгу

палива, які виходять з анодів комірок SOFC, ілюструється графіками рис. 4, при цьому температура реагуючих компонентів на виході з катодів та анодів стеків SOFC прийнята у розрахунках рівною 1190 K.

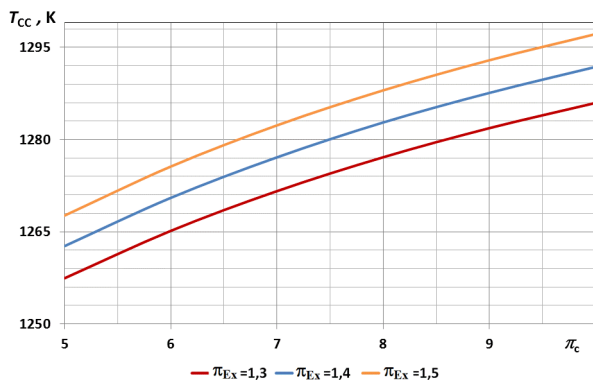


Рис. 4. Температура газопарової суміші T_{CC} на виході з камери згоряння

Залежності потужності N_{GT} газотурбінної частини установки для гібридної електростанції потужністю 2500 кВт показані на рис. 5.

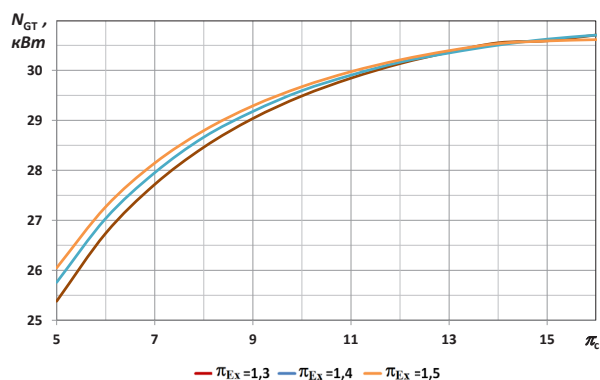


Рис. 5. Зміна потужності газотурбінної частини SOFC-GT, що припадає на один стек

Основні параметри суднової гібридної електростанції SOFC-GT потужністю 2500 кВт, розраховані на умови ISO, наведені в табл. 2.

Висновки. Розроблено схему перспективної суднової електростанції SOFC-GT, яка використовує стеки твердооксидних паливних елементів, а також контактний газотурбінний агрегат, що працює з перерозширенням.

Розроблено математичну модель гібридної схеми SOFC-GT, яка дозволяє оптимізувати термодинамічні параметри її газотурбінної частини.

Встановлено, що величина температури газу перед турбіною в розглянутій схемі зде-

Таблиця 2. Параметри гібридної SOFC-GT електростанції потужністю 2500 кВт

Параметр	Значення
1. Число стеків Siemens Westinghouse	14
2. Температура зовнішнього повітря, К	288
3. Витрата повітря через компресор ГТД, кг/с	3,939
4. Міра підвищення тиску в компресорі ГТД	8,0
5. Температура повітря на вході в ПП1, К	575
6. Внутрішній ККД компресора, %	80
7. Температура повітря на виході з ПП1, К	655
8. Температура суміші повітря та пари на виході з ПП2, К	1043
9. Температура суміші повітря та пари на виході зі стеку, К	1183
10. Тиск газоподібних компонентів на виході зі стеку, МПа	0,7702
11. Витрата суміші газів та пари на виході зі стеків, кг/с	4,1137
12. Витрата палива на електростанцію, кг/год	362,9
13. Температура газопарової суміші на виході з КЗ, К	1288
14. Температура газопарової суміші на вході в турбіну, К	950
15. Витрата суміші на вході в турбіну, кг/с	4,1137
16. Міра пониження тиску в турбіні ГТД	10,73
17. Внутрішній ККД турбіни, %	88
18. Температура суміші на виході з турбіни, К	565
19. Температура суміші на вході в УПГ, К	492
20. Температура суміші на виході з УПГ, К	447
21. Тиск пари у сепараторі УПГ, МПа	0,8023
22. Паропроодуктивність УПГ, кг/с	0,073
23. Температура пароперегріву, К	484
24. Міра підвищення тиску в ексгаустері ГТД	1,5
25. Внутрішній ККД ексгаустера, %	85
26. Температура суміші на вході в ексгаустер, К	294,0
27. Температура газу на виході з ексгаустера, К	335
28. Вихід конденсату, кг/год	549
29. Потужність ГТД, кВт	403
30. Потужність стеку SOFC Siemens Westinghouse, кВт	146,5
31. Потужність батареї стеків, кВт	2051
32. Загальна потужність електростанції, кВт	2454
33. Ефективний ККД електростанції, %	55,25

більшого визначається проєктними параметрами паливних елементів, підвищенням тиску повітря у компресорі та ексгаустері, кількістю перегрітої пари, що генерується в утилізаційному парогенераторі, а також температурою за повітропідігрівачем другого ступеня.

Доведено перспективність використання газотурбінного циклу із впорскуванням водяної пари в камеру згоряння та турбіною перерозширення для утилізації теплоти відхідних газів паливних елементів, а також підвищення ефективності енергосистеми.

Показано, що використання контактного газотурбінного агрегату з турбіною перероз-

ширення дозволяє досягти загальної ефективності комплексу 55,25% у разі робочої температури SOFC 1183 К та його ККД 46,24%.

Потрібні подальші дослідження в напрямі оптимізації термодинамічних параметрів

елементів теплової схеми SOFC-GT, вибору ефективних твердооксидних паливних елементів, що працюють на різних паливах, розробки конструктивних схем газотурбінних допалювачів їх відхідних газів.

Список літератури

- [1] Faleh S., Khir T. SOFC-Gas Turbine Hybrid Power Plant: Exergetic Study. Rotating Machines. / Edited by Y. Li. 2022. 16 p.
- [2] U.S. Department of Transportation. Prototype Design and Evaluation of Hybrid Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine Systems for Use in Locomotives. Office of Research, Development and Technology Washington, DC 20590, DOT/FRA/ORD-19/43, 2019. 114 p.
- [3] Wang Z., Chen H., Xia R., Han F., Ji Y., Cai W. Energy, exergy and economy (3E) investigation of a SOFC-GT-ORC waste heat recovery system for green power ships. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022. Vol. 32, 101342.
- [4] Wilson J.A., Wang Y., Carroll J., Raush J., Arkenberg G., Dogdibegovic E., Swartz S., Daggett D., Singhal S., Zhou X.D. Hybrid Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Model Development for Electric Aviation. *Energies*, 2022. Vol. 15, 2885.
- [5] McPhail, S.J., Leto, L., Boigues-Muñoz, C. The Yellow Pages of SOFC Technology, International Status of SOFC Deployment 2012–2013, IEA Implementing Agreement Advanced Fuel Cells, Annex 24 – SOFC. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/311869822_The_Yellow_Pages_of_SOFC_Technology_International_Status_of_SOFC_deployment_2012-2013.
- [6] National Fuel Cell Research Center. Hybrid Fuel Cell / Gas Turbine Systems. 2015. URL: http://www.nfrcr.uci.edu/PDF_Research_Summaries/HYBRIDfuelCELL_GASTurbineSystems-AnalysesHybridFuel-CellGasTurbineSystems.pdf.
- [7] Saisirirata P. The Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) and Gas Turbine (GT) Hybrid System Numerical Model. *Energy Procedia*, 2015. Vol. 79, pp. 845–850.
- [8] De La Cruz C.T.C., Herz G., Reichelt E., Jahn M. Modelling of a Novel Atmospheric SOFC/GT Hybrid Process and Comparison with State-of-the-Art SOFC System Concepts. *Fuel Cells*, 2020. Vol. 20. No. 5, pp. 608–623.
- [9] Duong P.A., Ryu B., Kim C., Lee J., Kang H. Energy and Exergy Analysis of an Ammonia Fuel Cell Integrated System for Marine Vessels. *Energies*, 2022. Vol. 15, 3331.
- [10] Lao X.S., Ma C. Performance Analysis of SOFC/GT Combined Cycle System with Preheater Arranged after the Turbine. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021. Vol. 701, 012047.
- [11] Zhang B., Maloney D., Harun N.F., Zhou N., Pezzini P., Medam A., Hovsapien R., Bayham S., Tucker D. Rapid Load Transition for Integrated Solid Oxide Fuel Cell – Gas Turbine (SOFC-GT) Energy Systems: A Demonstration of the Potential for Grid Response. *Energy Conversion and Management*, 2022. Vol. 258. No. 15, 115544.
- [12] Serbin S., Washchilenko N., Cherednichenko O., Dzida M., Chen D. Application analysis of a hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine system for marine power plants. *Ships and Offshore Structures*, 2022. Vol. 17. No. 4, pp. 866–876.
- [13] Bakalis D.P. Turbomachinery Analysis and Design for Hybrid SOFC-GT Systems Optimized Performance : PhD thesis. University of Thessaly, 2014. 171 p.

© Ващиленко М.В., Сербін С.І., Патлайчук О.В.

Дата надходження статті до редакції: 19.06.2023

Дата затвердження статті до друку: 26.10.2023