

Автомобілі з паливними комірками на водні з протонообмінною мембраною

Зміна клімату змістила фокус з викопного палива на чисті та відновлювані джерела енергії, а воднева енергетика стала глобальним рішенням для багатьох галузей, враховуючи автомобільний транспорт. Водневі паливні елементи (комірки), зокрема протонообмінні мембранні паливні комірки (PEMFC), є ключовими для зеленої революції завдяки високій ефективності перетворення енергії та нульовим рівнем викидів. Паливні елементи з протонообмінною мембраною використовують як паливо газоподібний водень, як окислювач – кисень з повітря, твердий електроліт і платиновий каталізатор.

Транспортні засоби на паливних комірках (Fuel-cell electric vehicles FCEVs) з використанням водню належать до транспортних засобів з нульовими викидами. В 2007 р. компанія «Toyota» випустила свій перший автомобіль з паливними комірками «Toyota Mirai» з електричним двигуном потужністю 113 кВт. Замість двигуна внутрішнього згоряння цей автомобіль має стек паливних комірок, що виробляє електричний струм. Студенти Делфтського технічного університету (TU Delft) (Нідерланди) створили гоночний автомобіль «Forze IX», який є найшвидшим гоночним автомобілем з паливними комірками на водні у світі. Автомобільні компанії «Toyota» та «Hyundai» планують виробляти 3,7 млн транспортних засобів з паливними комірками на водні до 2030 р.

У роботі описано автомобіль на водневих паливних комірках, який спроектовано в програмному середовищі ADVISOR MATLAB. Підраховано також показники використання енергії в силових агрегатах автомобіля для різних автомобільних циклів. Найбільші втрати енергії одержано в міському циклі на паливних комірках автомобіля. Було досліджено, що за рахунок частих зупинок ефективність використання енергії паливними комірками падає до 78 %, але покращується ефективність батареї до 74 %. Моделювання в ADVISOR показує, що автомобіль на водневих паливних комірках викидає лише воду.

Паливна комірка з протонообмінною мембраною (полімерною електролітною мембраною) складається з електролітної мембрани, затиснутої між анодом (негативним електродом) і катодом (позитивним електродом). Проточні пластини (flow plates) виконують кілька важливих функцій: 1) направляють водень і кисень до електродів; 2) відводять воду і тепло від паливного елемента; 3) проводять електрони від анода до електричного кола і назад до катода.

Було досліджено і проаналізовано декілька тисяч зображень паливних комірок PEMFC з низькою і надвисокою роздільною здатністю, що дало змогу більш детально ознайомитися з процесами, що проходять всередині комірки і виявити зміни, які відбуваються з мембраною.

Ключові слова: *автомобільний транспорт; автомобіль на водневих паливних комірках; водень; паливні комірки; Advisor Matlab; протонообмінна мембрана.*

Постановка проблеми. *Зміна клімату змістила фокус з викопного палива на чисті та відновлювані джерела енергії. Водневі паливні комірки (елементи), зокрема протонообмінні мембранні паливні комірки (PEMFC), є ключовими для зеленої революції завдяки високій ефективності перетворення енергії та нульовим рівнем викидів. Першим автомобілем на водневих паливних комірках вважають «Honda FCX», який в 2002 р. був сертифікований агенцією з охорони навколишнього середовища (EPA), США. В 2007 р. компанія «Toyota» випустила свій перший автомобіль з паливними комірками «Toyota Mirai» з електричним двигуном потужністю 113 кВт. Замість двигуна внутрішнього згоряння цей автомобіль має стек паливних комірок, що виробляє електричний струм [1]. Паливна комірка – це пристрій, який перетворює хімічну енергію в електричну за допомогою окислення палива. Паливні елементи з протонообмінною мембраною використовують як паливо газоподібний водень, як окислювач – кисень з повітря, твердий електроліт і платиновий каталізатор.*

Один із автомобілів «Toyota Mirai», що був наданий в Житомирській політехніці компаніями «Українська воднева рада» та «Водень України», знаходиться зараз в лабораторії кафедри «Автомобілі і транспортні технології». Автомобіль використовується для наукових досліджень, а також в навчальному процесі зі студентами, що навчаються за освітніми програмами «Автомобільний транспорт» і «Розумний транспорт». Компанія «Водень України» є також ініціатором будівництва заводу з виробництва водню в Україні, поблизу м. Рені Одеської області.

Транспортні засоби (ТЗ) на паливних комірках (Fuel-cell electric vehicles, FCEVs) з використанням водню належать до транспортних засобів з нульовими викидами. Європейська комісія планувала, що в 2050 р. водень може становити 32 % палива в Європі. До 2030 р. в Європі планується відкрити до

4500 водневих заправних станцій. Автомобільні компанії «Toyota» та «Hyundai» планують виробляти 3,7 млн ТЗ з паливними комітками на водні (FCEV) до 2030 р. Компанія «Hyundai (HMG)» планує випускати 700 тис. систем паливних коміток щорічно до 2030 р., враховуючи 500 тис. одиниць для FCEV [1].

На виставці «Hydrogen Technology Expo Europe», яка проходила в 2023 р. в місті Messe Bremen, Німеччина, було представлено гоночний автомобіль «Forze VIII». Цей автомобіль є прототипом найшвидшого водневого автомобіля у світі «Forze IX». Що найбільш вражає, що цей автомобіль, як і попередні версії «Forze», створили студенти Делфтського технічного університету. Основна відмінність «Forze IX» від попередника – це його чотири баки для водню, який подається під тиском 700 бар. Комбінована потужність автомобіля 240 кВт. Також автомобіль містить подвійний стек паливних коміток, компресори, фільтри тощо, які є більш ефективними, ніж у попередника. Автомобіль має більшу довжину, оскільки двигун розташований в передній частині автомобіля [2].

Аналіз останніх досліджень. У [1] описано автомобіль на водневих паливних комітках, який спроектовано в програмному забезпеченні Matlab ADVISOR. Моделювання в ADVISOR показує, що автомобіль на водневих паливних комітках викидає лише воду. В роботі також показано переваги автомобілів на водневих паливних комітках. На відміну від повітря, яке має природну подачу, подача водню в автомобілях на паливних комітках починається з технологічного бака. Водень зберігається за високого тиску (700 бар) протягом усього терміну служби транспортного засобу [3].

У [4] досліджено проблеми затоплення водневих паливних коміток водою. Шляхом комп'ютерного моделювання, що виконано на суперкомп'ютерах, було одержано десятки тисяч відеозображень паливних коміток типу PEMFC. Паливні комітки на водні надзвичайно чутливі до забруднення, тому що як і частинки, так і хімічні елементи можуть спричинити отруєння каталітичного шару паливної комітки, який є складовою частиною мембрани. Але забруднення мають бути усунені, оскільки каталітичний шар дуже чутливий до забруднення компонентами сірки, вуглеводнями та оксидом азоту. Якщо не буде ефективної системи фільтрації, то це буде впливати на продуктивність паливної комітки і скорочувати час її життя [2].

Моделюванню автомобілів з паливними комітками на водні у середовищі ADVISOR присвячено роботи [1, 5–9]. У [10] було виконано експериментальні дослідження і моделювання потужності паливних коміток PEMFC. Було виявлено, що метод нейронних мереж показує найкращий збіг продуктивності, що одержана внаслідок експерименту і моделювання.

Метою статті є проектування водневого автомобіля з паливними комітками в Matlab Advisor і дослідження протонообмінних мембранних паливних коміток.

Викладення основного матеріалу.

1. Система паливних коміток

Воднева паливна комітка постачає водень до анода і повітря до катода. На аноді каталізатор розщеплює молекули водню на протони і електрони. Протони проходять через мембрану, в той час коли електрони генерують електричний струм. Кисень, що постачається з повітря з'єднується з воднем і утворює воду, що є тільки єдиним викидом від роботи паливної комітки [2].

Стек паливних коміток. Сотні паливних коміток утворюють стек паливних коміток. Кожна паливна комітка складається з мембранної електродної системи, яка має три складові частини: протонообмінна мембрана (proton exchange membrane, PEM), катод та анод. Далі це приєднується до газового дифузійного шару (gas diffusion layer, GDL) з одного боку і біполярної пластинки з іншого. Коли паливні комітки з'єднуються разом, то біполярна пластинка допомагає направляти водень до анода з одного боку мембрани і кисень до катода з іншого [2]. Наприклад, в автомобілі «Forze» встановлено стек паливних коміток NM5- EVO. Цей модуль має 335 паливних коміток потужністю 76 кВт з опором 201 В. Кількість паливних коміток може бути різною: 215 паливних коміток (39 кВт), 119 коміток (27 кВт) і 71 комітка (16 кВт) [2].

Одним з найбільш поширених типів паливних елементів є паливні елементи з протонообмінною мембраною (PEMFC), також відомі як паливні елементи з полімерною електролітною мембраною (polymer electrolyte membrane, PEM). На рисунку 1 показано паливну комітку з полімерною електролітною мембраною і її складові частини. Такий паливний елемент складається з електролітної мембрани, затиснутої між анодом (негативним електродом) і катодом (позитивним електродом) [12]. Проточні пластини (flow plates) виконують кілька важливих функцій: 1) направляють водень і кисень до електродів; 2) відводять воду і тепло від паливного елемента; 3) проводять електрони від анода до електричного кола і назад до катода [12].

Під час проектування паливної комітки PEMFC потрібно знайти баланс між довговічністю і продуктивністю. Як зауважено в [2], якщо потрібно досягти велику потужність, яка необхідна у гонках, варто вибрати тоншу мембрану, яка має вищу протонну провідність. Якщо потрібно забезпечити систему більшою довговічністю, тоді варто вибирати товстішу і більш надійну мембрану. На продуктивність паливних коміток найбільше впливають температура і вологість. Для того щоб мінімізувати втрати, потрібно розвивати систему висушування (drier system). Система, яка функціонує за високої температури, потребує менше теплового (thermal) управління і, отже, допомагає уникнути охолоджуючих вентиляторів та систем (cooling fans and circuits), які знижують ефективність. Дуже важливо через те мати матеріали, які

можуть працювати за високих температур [2]. Вигляд паливної комірки та її складові частини показано на рисунку 1, що адаптований з [12].

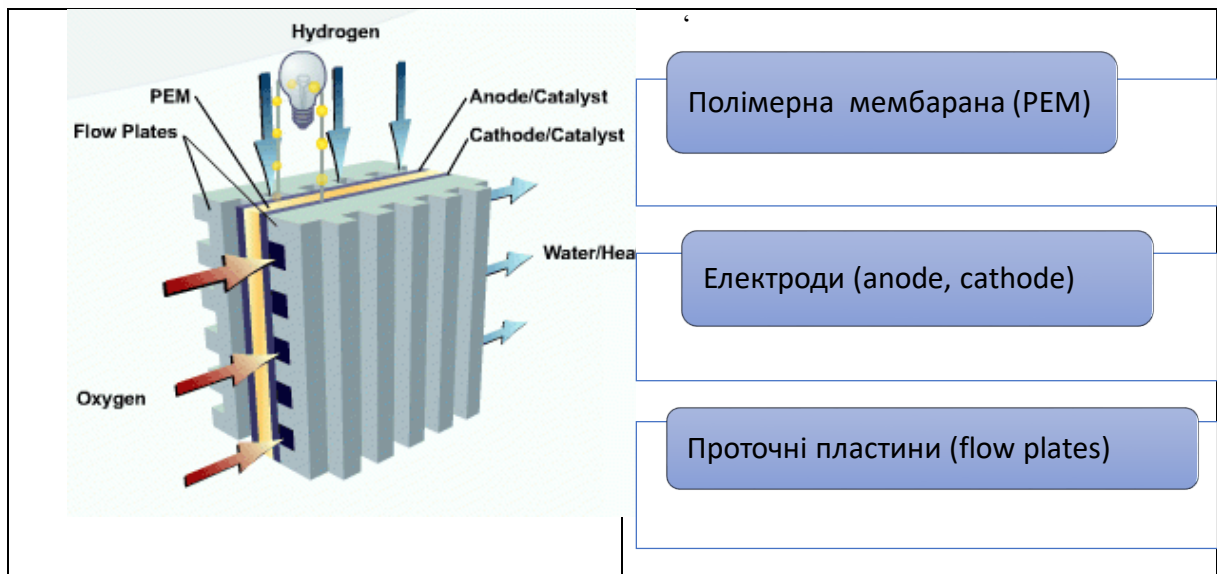


Рис. 1. Вигляд паливної комірки та її складові частини (адаптовано з [12])

Паливна комірка – це електрохімічний прилад і на відміну від двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) тільки декілька частин рухаються. На відміну від ДВЗ, де паливо і повітря утворюють суміш, яка спалахує, у водневій паливній комірці паливо і повітря більше відокремлені [2]. На рисунку 2 показано структурну схему випробовувань системи паливних комірок, що адаптовано з [10].

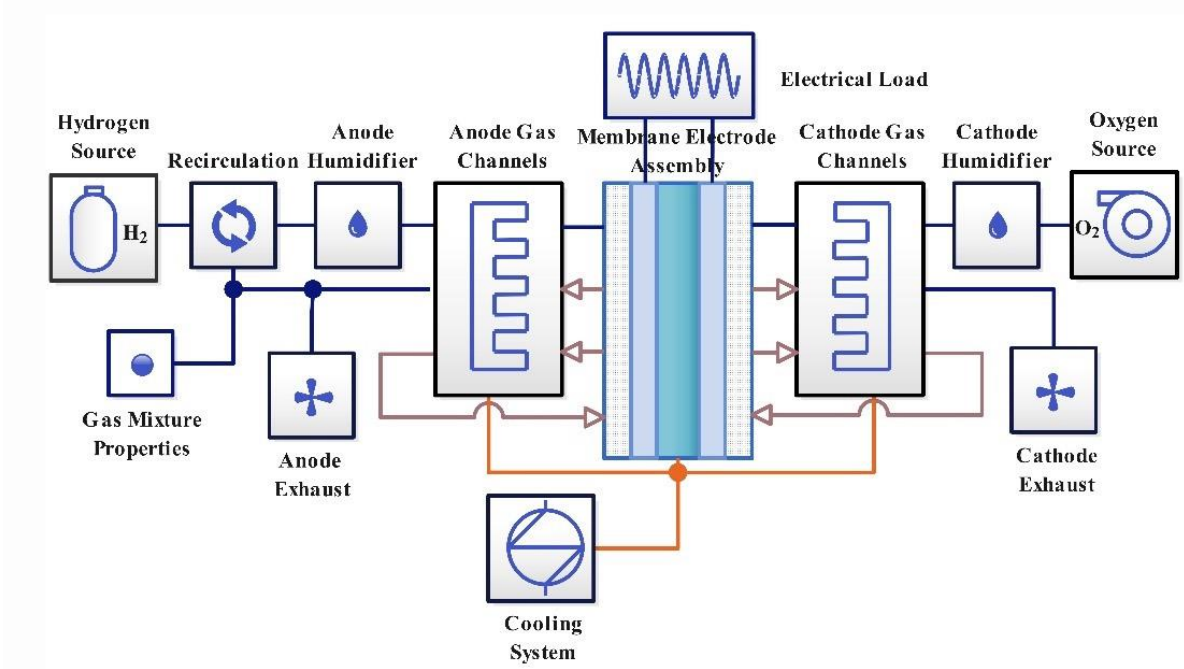


Рис. 2. Структурна схема випробовувань системи паливних комірок, що адаптовано з [10]

Експериментальні результати [10] демонструють, що криві поляризації, передбачені моделлю на основі згорткової нейронної мережі (convolutional neural network, CNN), узгоджуються з реальними кривими, з точністю прогнозування приблизно 0,96, часом прогнозування 1 мкс і періодом ітерації менше 1 с за цикл. Порівняльний аналіз показує, що точність прогнозування моделі на основі CNN була вищою, ніж у інших основних алгоритмів машинного навчання. У реальних сценаріях модель на основі CNN точно прогнозує потужність PEMFC.

2. Проектування автомобіля в Advisor Matlab

У [9] проведено моделювання легкового автомобіля потужністю 50 кВт на водневих паливних комірках у середовищі ADVISOR на основі програмного забезпечення MATLAB / Simulink. Моделювання проводилося для двох циклів водіння: CYC_US06 та CYC_UDDS. На рисунку 3 представлено результати моделювання міського циклу CYC_UDDS. Як видно з графіка, в цьому циклі автомобіль робить багато зупинок, час простою становить 259 с, а тому і середня швидкість його руху досить мала – 31,51 км/год. Час пробігу складає 1369 с, автомобіль долає 11,99 км, досягаючи максимальної швидкості 91,25 км/год.

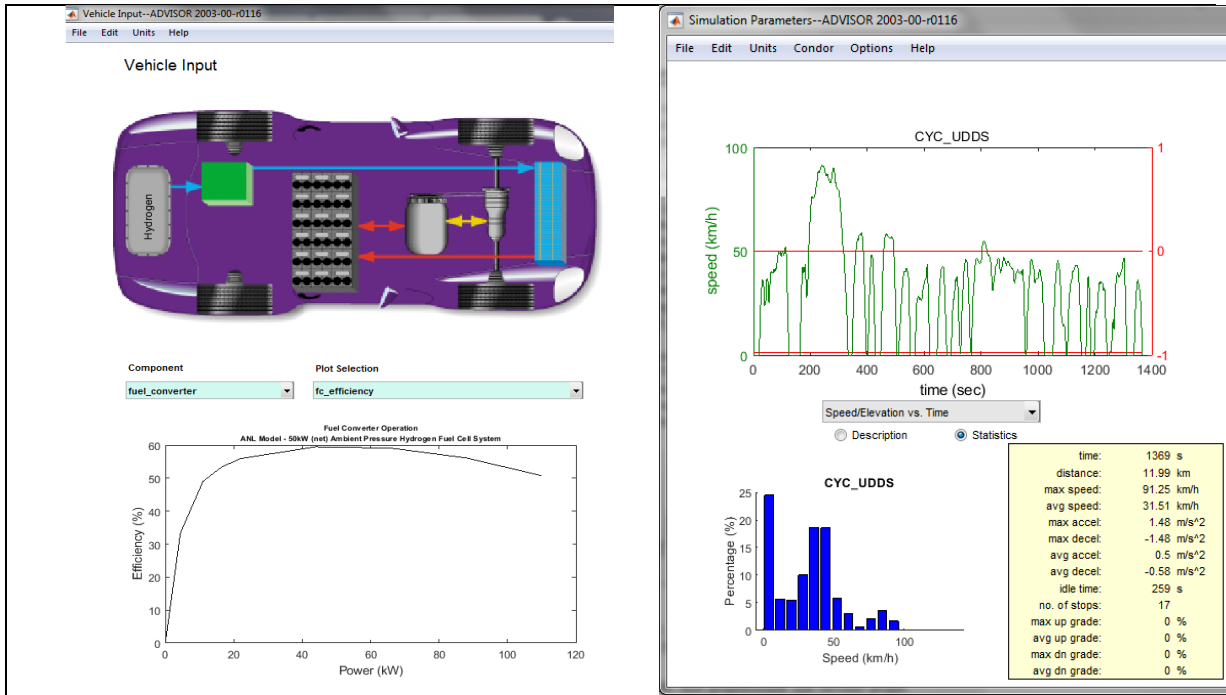


Рис. 3. Моделювання CYC_UDDS циклу водіння в середовищі Matlab Advisor

На рисунку 4 зазначено показники використання енергії в силових агрегатах автомобіля на водневих паливних для того ж CYC_UDDS циклу. Найбільші втрати енергії в міському циклі спостерігалися на паливних комірках автомобіля. За рахунок частих зупинок ефективність використання енергії паливними комірками падає до 78 %, але покращується ефективність батареї до 74 %.

The figure shows the 'Energy Usage Figure--ADVISOR 2003-00-r0116' window. It contains a table with energy usage data in kJ for various components, split into Power Mode and Regen Mode. The table has columns for In, Out, Loss, and Eff. for each component.

Component	POWER MODE				REGEN MODE			
	In	Out	Loss	Eff.	In	Out	Loss	Eff.
Fuel	0	12602						
Fuel Converter	12602	6282	6320	0.5			0	
Clutch								
Hyd. Torque Converter								
Generator								
Torque Coupling								
Energy Storage	2591	2591	252	0.91				
Energy Stored	-252							
Motor/Controller	5872	4574	1298	0.78	818	548	270	0.67
Gearbox	4574	4207	366	0.92	906	818	88	0.9
Final Drive	4207	4207	0	1	906	906	0	1
Wheel/Axle	4207	3900	308	0.93	1658	1659	-1	1
Braking							753	
Aux Loads	958	0	958	0				
Aero			1056					
Rolling			1186					
*Overall System Efficiency								
0.174								
*Overall energy efficiency is calculated as: (aero + rolling)/(fuel in - ees storage)								

Рис. 4. Показники використання та втрати енергії автомобіля (Matlab Advisor)

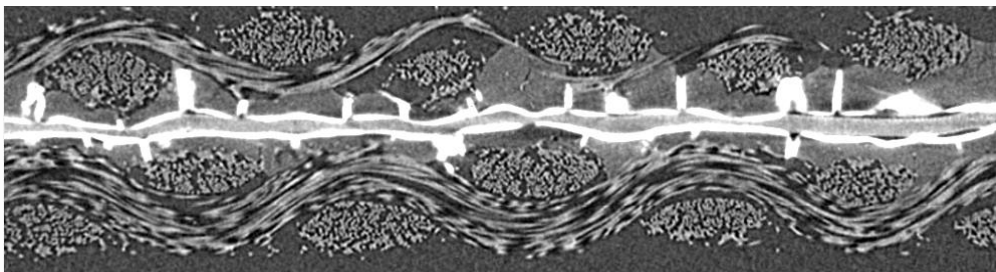
3. Дослідження протонообмінної мембрани паливного елемента

Протонообмінна мембрана паливна комірка (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC), споживаючи водень і кисень для виробництва електроенергії, працює за низької температури ($< 80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Вона електрохімічно перетворює водень на протони та електрони на аноді, які реагують з киснем на катоді, виробляючи електрику і воду, як єдиний побічний продукт і становить складне пористе середовище [4]. PEMFC складається з твердої електролітної мембрани, затиснутої між нанопористими електрокатализаторами з обох боків, покритої мікропористим шаром (MPL), мікропористим газодифузійним шаром (GDL) з проточними каналами міліметрового масштабу.

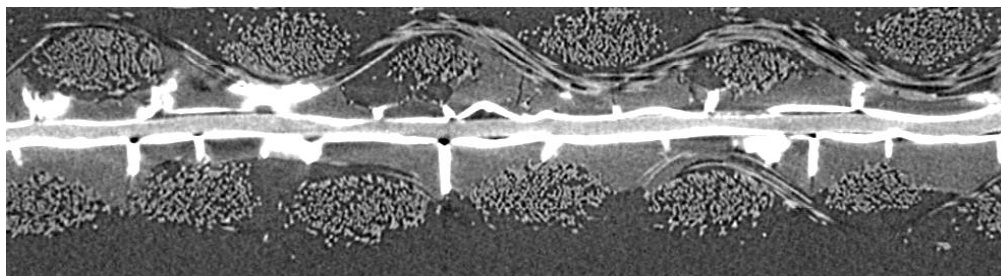
Ця багатошарова архітектура PEMFC максимізує дифузію газу до активних каталітичних центрів і мінімізує накопичення води в шарах каталізатора. Продуктивність PEMFC сильно залежить від дифузії та використання палива й окислювальних газів на аноді та катоді, а також від ефективного управління кількістю води, що утворюється на катоді. При високих навантаженнях вода може конденсуватися в краплі в пористих середовищах. Якщо краплі не видалити, вода буде накопичуватися в GDL і MPL, ускладнюючи дифузію газу до активних ділянок і тим самим затоплюючи PEMFC. Таким чином, компроміс між затопленням водою та зневодненням має вирішальне значення для високопродуктивних PEMFC [4]. PEMFC, які споживають водень і кисень для виробництва чистої електроенергії та води, зазнають гострих проблем з заповненням їх водою. Точне моделювання течіння води є складним завданням через багатофазову, багатокомпонентну, реактивну динаміку в багатошарових пористих середовищах [4]. В [4] проведено дослідження мембрани за допомогою великомасштабного фізично точного моделювання з використанням глибокого навчання і запропоновано основні шляхи покращення мембрани для створення більш ефективних та стійких паливних комірок.

У [4] розглядалися три різні типи зображень: 1) низької роздільної здатності ($275 \times 1000 \times 2000$ при $2,8\text{ }\mu\text{m}$); 2) 2D поперечним з перерізом надроздільної здатності ($1100 \times 4000 \times 8000$ при 700 nm); 3) сегментовані зображення з декількома мітками.

У цій роботі проаналізовано приблизно $4 \cdot 10^7$ зображень паливних комірок з файлу LRTest.tif, в якому містяться експериментальні дані роботи [4]. Перша половина зображень з цього файлу мали низьку роздільну здатність (low resolution), а друга половина зображень має супервисоку роздільну здатність, як на рисунку 5, де показані дві фотографії паливних комірок з надвисокою роздільною здатністю. На фотографіях можна бачити мембрану з каталітичним шаром, далі добре видно мікропористий шар, що прилягає до каталітичного шару. Дуже важливо, що добре розрізняються як перпендикулярні, так і паралельні волокна вуглецевого матеріалу.



а)



б)

Рис. 5. Зображення PEMFC з надвисокою роздільною здатністю: а – фото 4000; б – фото 4100

Було проаналізовано також результат дослідження з 8 тисяч зображень протонообмінної мембрани паливного елемента SRSegFinal_Processed_oneWeave_Opened.tif. Ці зображення були отримані в дослідницькій

лабораторії Сіднея (Австралія) в чорному кольорі [4], де не було практично видно складових паливної комірки. Після обробки зображення і інвертування їх одержані фото, одне з яких зображено на рисунку 6. Ці фото зроблено з надвисокою роздільною здатністю, з інтервалом кожні 500 фото, що дає змогу більш детально проаналізувати процеси, що проходять в середині PEMFC і зміни, які відбуваються з мембраною.

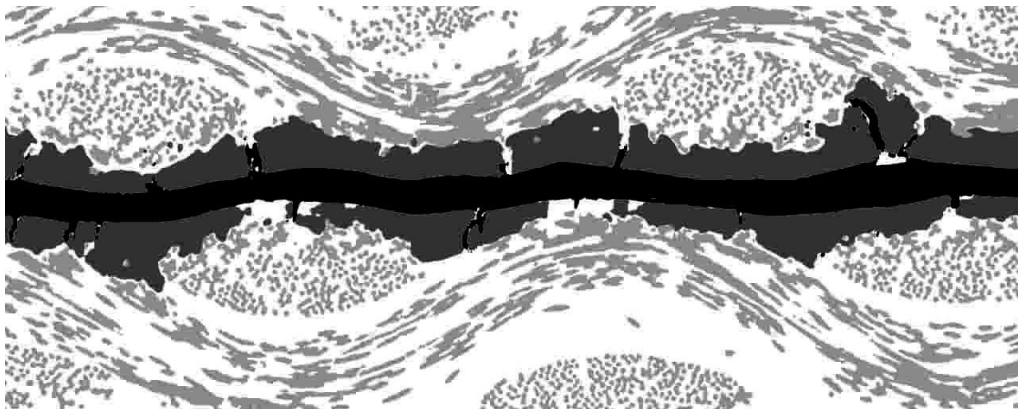


Рис. 6. Результати комп'ютерного дослідження *RSegFinal_Processed_oneWeave_Opened.tif*

Висновки:

1. Створено автомобіль з паливними комірками на водні в середовищі Advisor Matlab та підраховано показники використання енергії в силових агрегатах автомобіля для різних автомобільних циклів;
2. Найбільше втрати енергії в міському циклі одержано в паливних комірках автомобіля. За рахунок частих зупинок ефективність використання енергії паливними комірками падає до 78 %, але покращується ефективність батареї до 74 %;
3. Проаналізовано декілька тисяч зображень паливних комірок PEMFC як з низькою роздільною здатністю, так і з супервисокою роздільною здатністю, що дало змогу більш детально зрозуміти процеси, що проходять всередині паливних комірок і виявити зміни, які відбуваються з мембраною;
4. Показано, що для аналізу продуктивності паливних комірок доцільно використовувати метод нейронних мереж.

Список використаної літератури:

1. Колодницька Р.В. Автомобілі на водневих паливних комірках: сучасний стан і перспективи / Р.В. Колодницька, В.П. Шумляківський // Технічна інженерія. – 2023. – Вип. 2 (92). – С. 9–15 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://ten.ztu.edu.ua/issue/view/17300>.
2. Hatton G. Hydrogen Tech Expro 2023 / G.Hatton // Race Engine Technology. – 2023. – Issue 149. – P. 58–68.
3. Béthoux O. Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art and Perspectives / O.Béthoux // Energies. – 2020. – Vol. 13 (21). DOI: 10.3390/en13215843hal-0303037.
4. Large-scale physically accurate modelling of real proton exchange membrane fuel cell with deep learning / Y.D. Wang, Q.Meyer, K.Tang and other // Nat Commun. – 2023. – Vol. 14. DOI: 10.1038/s41467-023-35973-8.
5. Колодницька Р.В. Проблеми і перспективи використання дизельного біопалива та водню в автомобільному транспорті / Р.В. Колодницька // Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту : матеріали ІХ-ої Міжнародної науково-технічної інтернет конференції, 14–15 квітня. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – С. 139–144.
6. Колодницька Р.В. Автомобілі на водневих паливних комірках. Мрія чи реальність для України? / Р.В. Колодницька, В.П. Шумляківський // Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту : тези XIII Міжнародної науково-практичної конференції, 26–28 жовтня. – Житомир, 2020. – С. 34–36.
7. Fuel cell vehicles in Ukrainian perspective / R.Kolodnytska, A.P. Kravchenko, A.V. Ilchenko, O.Vasylyev // International Conference on Sustainable Materials and Energy Technologies, 12–13th of September. – Coventry, UK, 2019. – 30 p.
8. Колодницька Р.В. Автомобілі з паливними комірками на водні / Р.В. Колодницька, Д.Б. Бегерський, В.П. Шумляківський // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології : матеріали VII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції, 23–24 листопада. – Харків : ХНАДУ, 2020. – С. 66–68.
9. Єрмак С. Моделювання автомобіля на паливних комірках в середовищі ADVISOR / С.Єрмак // Автомобільний транспорт. – «Житомирська політехніка», 2023. – 78 с.
10. Yang J. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Power Prediction Based on Ridge Regression and Convolutional Neural Network Data-Driven Model / J.Yang, Y.Wu, X.Liu // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, Issue 14. DOI: 10.3390/su151411010.
11. Mitofsky A.M. Direct Energy Conversion / A.M. Mitofsky. – 2018. – 374 p. [Electronic resource]. – Access mode : https://www.trine.edu/books/documents/de_text1.0.0.pdf.
12. [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-animation-text-version>.

References:

1. Kolodnytska, R.V. and Shumliakivskiy, V.P. (2023), «Avtomobili na vodnevnykh palyvnykh komirkakh: suchasnyi stan i perspektyvy», *Tekhnichna inzheneriia*, Issue 2 (92), pp. 9–15, [Online], available at: <http://ten.ztu.edu.ua/issue/view/17300>
2. Hatton, G. (2023), «Hydrogen Tech Expro 2023», *Race Engine Technology*, Issue 149, pp. 58–68.
3. Béthoux, O. (2020), «Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art and Perspectives», *Energies*, Vol. 13 (21), doi: 10.3390/en13215843hal-0303037.
4. Wang, Y.D., Meyer, Q., Tang, K. et al. (2023), «Large-scale physically accurate modelling of real proton exchange membrane fuel cell with deep learning», *Nat Commun*, Vol. 14, doi: 10.1038/s41467-023-35973-8.
5. Kolodnytska, R.V. (2021), «Problemy i perspektyvy vykorystannia dyzelnoho biopalyva ta vodniu v avtomobilnomu transporti», *Problemy i perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*, materialy IX-oi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet konferentsii, 14–15 kvitnia, VNTU, Vinnytsia, pp. 139–144.
6. Kolodnytska, R.V. and Shumliakivskiy, V.P. (2020), «Avtomobili na vodnevnykh palyvnykh komirkakh. Mriia chy realist dlia Ukrainy?», *Suchasni tekhnologii ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu*, tezy XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 26–28 zhovtnia, Zhytomyr, pp. 34–36.
7. Kolodnytska, R., Kravchenko, A.P., Ilchenko, A.V. and Vasylyev, O. (2019), «Fuel cell vehicles in Ukrainian perspective», *International Conference on Sustainable Materials and Energy Technologies*, 12–13th of September, Coventry, UK, 30 p.
8. Kolodnytska, R.V., Beherskyi, D.B. and Shumliakivskiy, V.P. (2020), «Avtomobili z palyvnymy komirkamy na vodni», *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii*, materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii, 23–24 lystopada, KhNADU, Kharkiv, pp. 66–68.
9. Yermak, S. (2023), «Modeliuvannia avtomobilia na palyvnykh komirkakh v seredovyschi ADVISOR», *Avtomobilnyi transport*, «Zhytomyrska politekhnika», 78 p.
10. Yang, J., Wu, Y. and Liu, X. (2023), «Proton Exchange Membrane Fuel Cell Power Prediction Based on Ridge Regression and Convolutional Neural Network Data-Driven Model», *Sustainability*, Vol. 15, Issue 14, doi: 10.3390/su151411010.
11. Mitofsky, A.M. (2018), *Direct Energy Conversion*, 374 p, [Online], available at: https://www.trine.edu/books/documents/de_text1.0.0.pdf
12. [Online], available at: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-animation-text-version>

Колодницька Руслана Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-6943-3731>.

Наукові інтереси:

- альтернативні палива для автомобільного транспорту, включаючи водень;
- автомобілі з паливними комірками на водні;
- транспортні технології;
- композитні матеріали на основі натуральних волокон.

E-mail ruslanakolod2017@gmail.com.

Kolodnytska R.V.**Hydrogen-powered fuel cell cars with a proton exchange membrane.**

Climate change has shifted the focus from fossil fuels to clean and renewable energy sources, and hydrogen energy has become a global solution for many industries, including road transport. Hydrogen fuel cells, in particular proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs), are key to the green revolution due to their high energy conversion efficiency and zero-emission operation. Fuel cells with a proton exchange membrane use hydrogen gas as fuel, oxygen from the air, solid electrolyte and platinum catalyst as an oxidizing agent.

Fuel-cell electric vehicles (FCEVs) using hydrogen are zero-emission vehicles. In 2007, Toyota produced its first fuel cell vehicle, the Toyota Mirai, with a 113 kW electric motor. Instead of an internal combustion engine, this car has a stack of fuel cells that produces electric current. In 2019, students from the Technical University of Delft (TU Delft), the Netherlands created the Forze VIII race car, which is the fastest hydrogen-powered fuel cell racing car in the world. Automobile companies Toyota and Hyundai plan to produce 3.7 million FCEVs by 2030.

The paper describes a hydrogen fuel cell vehicle, which is designed in the ADVISOR MATLAB software environment. The indicators of energy use in the power units of the car for different automotive cycles are also calculated. Most of the energy loss in the urban cycle is obtained in the fuel cells of the car. It has been found that due to frequent stops, the energy efficiency of the fuel cells drops to 78%, but the efficiency of the battery improves by up to 74%. Simulations in ADVISOR show that a hydrogen fuel cell vehicle only emits water.

A fuel cell with a proton exchange membrane (polymer electrolyte membrane) consists of an electrolyte membrane sandwiched between the anode (negative electrode) and the cathode (positive electrode). Flow plates perform several important functions: 1) direct hydrogen and oxygen to the electrodes 2) remove water and heat from the fuel cell 3) conduct electrons from the anode to the electrical circuit and back to the cathode.

Several thousand low- and ultra-high-resolution images of PEMFC fuel cells were examined and analyzed, which made it possible to get acquainted with the processes taking place inside the cell in more detail and to identify changes that occur with the membrane.

Keywords: road transport; hydrogen fuel cell vehicle; hydrogen; fuel cells; Advisor Matlab; proton exchange membrane.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2024.