

Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет технологій та дизайну

Навчально – науковий інститут інженерії та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та електромеханіки

*Дипломна магістерська робота*

на тему **Паливні елементи для живлення електропобутових пристроїв**

Виконав студент групи МгЕМ - 21  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

Малий Я.С.

Керівник: Шведчикова І.О.

Рецензент: Демішонкова С.А.

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Навчально-науковий інститут інженерії та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та електромеханіки

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва)

Освітня програма Електропобутова техніка

(назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри КІЕМ

Злотенко Б. М.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА ДИПЛОМНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

**Малому Ярославу Станіславовичу**

1. Тема роботи Паливні елементи для живлення електропобутових пристроїв

Науковий керівник роботи Шведчикова Ірина Олексіївна, д.т.н., професор

затверджені наказом вищого навчального закладу “28” вересня 2022 року № 180-  
уч

2. Строк подання роботи студентом: 15.11.2022 р.

3. Вихідні данні до роботи: набори даних експерименту для аналізу впливу різних факторів на ефективність роботи паливних елементів.

4. Зміст дипломної роботи (перелік питань які потрібно розробити)

Аналітичний огляд різновидів паливних елементів. Методи дослідження паливних елементів. Експериментальне дослідження паливного елементу типу DEFC.

## 5. Консультанти розділів дипломної магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Шведчикова І.О. д.т.н.,проф.		
Розділ 2	Шведчикова І.О. д.т.н.,проф.		
Розділ 3	Шведчикова І.О. д.т.н.,проф.		

6. Дата видачі завдання 12.09.2022р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної магістерської роботи	Терміни виконання етапів	Примітка про виконання
1	Вступ	14.09.22	
2	Розділ 1. Аналітичний огляд різновидів паливних елементів	25.09.22	
3	Розділ 2. Методи дослідження паливних елементів	05.10.22	
4	Розділ 3. Експериментальне дослідження паливного елементу типу DEFC	24.10.22	
5	Висновки	30.10.22	
6	Оформлення дипломної магістерської роботи (чистовий варіант)	09.11.22	
7	Здача дипломної магістерської роботи на кафедру для рецензування (за 14 днів до захисту)		
8	Перевірка дипломної магістерської роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)		
9	Подання дипломної магістерської роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)		

Студент

\_\_\_\_\_

( підпис )

Ярослав Малий

(прізвище та ініціали)

Науковий керівник роботи

\_\_\_\_\_

( підпис )

Ірина ШВЕДЧИКОВА

(прізвище та ініціали)

Директор НМЦУПФ

\_\_\_\_\_

( підпис )

Олена ГРИГОРЕВСЬКА

(прізвище та ініціали)

## Анотація

### **Малий Я.С. Паливні елементи для живлення електро побутових пристроїв. – Рукопис**

Дипломна магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електропобутова техніка». – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2022 рік.

Дипломну магістерську роботу присвячено дослідженню паливних елементів для живлення електро побутових пристроїв, аналізу призначення та області використання паливних елементів. В роботі наведено приклади використання паливних елементів, розглянуто теоретичні підходи до розрахунків паливних елементів типу DEFC, здійснено експериментальні дослідження паливного елемента типу DEFC.

Розглянуто основне питання, а саме паливні елементи DEFC (на основі етанолу) для живлення електро побутових приладів. В рамках даної магістерської роботи здійснено опис фізичної моделі паливного елемента типу DEFC та оброблені експериментальні дані для аналізу режимів його роботи в умовах впливу різних факторів, надані партнерським університетом з Німеччини.

*Ключові слова: паливні елементи, енергетичні характеристики паливного елемента, ефективність паливного елемента.*

## **ABSTRACT**

**Maliy Y.S. Fuel cells for powering household appliances. - Manuscript**

Diploma master's thesis in the specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", educational program "Electric household appliances". - Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2022.

The master's thesis is devoted to the study of fuel cells for powering electrical household devices, analysis of the purpose and area of use of fuel cells, examples of the use of fuel cells, theoretical approaches to calculations of DEFC-type fuel cells, experimental studies of a DEFC-type fuel cell.

The main issue is considered, namely DEFC (ethanol-based) fuel cells for powering household electrical appliances. As part of this master's work, a description of the physical model of a DEFC-type fuel cell was made and experimental data were processed for the analysis of its operation modes under the influence of various factors, provided by a partner university from Germany.

*Key words: fuel cells, fuel cell energy characteristics, fuel cell efficiency.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИНИЙ ОГЛЯД РІЗНОВИДІВ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	11
1.1 Призначення та область використання паливних елементів.....	11
1.2 Різновиди паливних елементів.....	15
1.3 Приклади використання паливних елементів.....	22
1.4 Постановка задачі дослідження.....	27
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	28
2.1 Загальна характеристика методів наукових досліджень.....	28
2.2 Теоретичні підходи до розрахунків паливних елементів типу DEFC/DMFC.....	36
2.3 Обґрунтування вибору методу досліджень паливних елементів DEFC.....	41
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТУ DEFC.....	43
3.1 Опис експериментальної установки.....	43
3.2 Дослідження впливу концентрації етанолу на енергетичні характеристики паливного елемента .....	44
3.3 Дослідження впливу робочої температури на ефективність роботи паливного елемента.....	45
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТКИ.....	54

## ВСТУП

Паливні елементи є пристроями для прямого перетворення хімічної енергії палива в електричну. На відміну від теплових електричних станцій, які хімічну енергію палива спочатку перетворюють у теплоту – перегріту водяну пару під високим тиском, а потім з її допомогою приводять у рух ротори турбін та одержують електричну енергію, в паливних елементах хімічна енергія реагентів без проміжних перетворень конвертується в електричну. Електричні установки для живлення побутових пристроїв на основі паливних елементів є зручними у використанні. Масштабні дослідження щодо проблем електрохімії паливних елементів розпочались у другій половині ХХ століття у зв'язку з освоєнням космосу та створенням нової воєнної техніки.

Уперше про можливість створення паливних елементів повідомив у 1839 р. англійський аматор у галузі фізико хімії, товариш Майкла Фарадея Вільям Гроув. Спостерігаючи процес електролізу води в розчинах сірчаної кислоти, він виявив, що після відключення зовнішнього струму в електролітичній комірці генерується постійний струм. Однак ці висновки В. Гроува тоді не знайшли обґрунтування у подальших дослідженнях. Свій електрохімічний пристрій він, за пропозицією М. Фарадея, назвав «газовою батареєю». Назву «паливний елемент» цей пристрій одержав лише через 50 років, завдяки Людвігу Монде.

Принцип дії паливних елементів заснований на хімічній реакції окислювача і палива, в результаті якої безпосереднім шляхом отримують електроенергію. Подібну реакцію можна спостерігати при згорянні палива у спеціальних печах, проте в паливних елементах окисно-відновна реакція не супроводжується виділенням диму та полум'я. Реагенти, якими часто використовують водень і кисень, із заданою швидкістю подають від спеціальних насосів до електродів, занурених в електроліт з розчину їдкого калію. Електроди, які зазвичай виготовляють з нікелю, в

реакції не беруть участь, і тому вони не вимагають постійних заміन. На негативному електроді, до якого подають відновник водень, утворюються електрони. Навколо позитивного електрода, до якого підводять окисник кисень, виникають іони.

**Актуальність роботи.** Портативні паливні елементи, джерелом електроенергії яких є етанол, незабаром можуть стати реальними завдяки новому каталізатору, що руйнує міцні зв'язки всередині молекули, вивільняючи таким чином електрони і виробляючи електроенергію. Такі паливні елементи зможуть замінити батареї в ноутбуках та мобільних телефонах, а з часом зможуть бути використані і для живлення електродвигунів автомобілів. Паливні елементи на основі етанолу можуть стати набагато більш ефективними, ніж традиційні етанолові двигуни. Також вони можуть стати більш практичними, ніж водневі паливні елементи, оскільки етанол легше зберігати та транспортувати. Попередні каталізатори перетворювали етанол у оцтову кислоту та ацетальдегід. Такий процес вивільняє всього декілька електронів на молекулу спирту, виробляючи при цьому слабкий струм. Подальший розклад етанолу до вуглекислого газу міг би вивільнити значно більшу кількість електронів (в загальному 12 електронів на молекулу етанолу), генеруючи при цьому високий струм, проте для цього необхідно зруйнувати міцний хімічний зв'язок між двома атомами вуглецю. Для його руйнування розробники мусили застосовувати високу напругу, що робило весь процес неефективним: майже вся напруга, вироблена окисленням етанолу використовувалась для підтримання реакції. Щоб перейти до комерційного використання у паливних елементах, каталізатор ще мусить зазнати значних змін. Окрім проблеми включення каталізатору до складу паливних елементів, та вдосконалення останніх для виробництва електроенергії високої напруги, розробники будуть змушені знайти спосіб зменшити ціну. Все ж, новий каталізатор є вагомим кроком вперед у порівнянні із попередніми спробами. «Руйнування зв'язку вуглець-вуглець при низьких температурах є надзвичайно складною проблемою»,



каже Енді Херінг (Andy Herring), професор хімічної інженерії (Colorado School of Mines, Golden, CO). «Сам факт руйнування зв'язку новим каталізатором є дуже захоплюючим». Проте він додає «це лише один крок у напрямку мрії створення паливних елементів із прямим використанням етанолу».

**Метою роботи** є обробка даних експериментальних досліджень впливу різних факторів на ефективність роботи паливного елемента на основі етанолу для його використання як джерела живлення портативних електронних пристроїв для електропобутової техніки.

**Об'єкт дослідження** - паливний елемент типу DEFC.

**Предмет дослідження** - опис фізичної моделі паливного елемента типу DEFC та експериментальні дані для аналізу режимів його роботи в умовах впливу різних факторів.

**Метод досліджень** - експериментальний метод знайшов широке застосування при дослідженні етанольних паливних елементів та показав свою ефективність, що відображено в чисельних наукових публікаціях.

**Практичне значення отриманих результатів.**

Для паливного елемента типу DEFC важливо дослідити вплив концентрації етанолу та температури функціонування паливного елемента на енергетичні характеристики – струм, напругу та електричну потужність у вихідному колі паливного елемента. Найбільш достовірну та повну картину стосовно впливу зазначених факторів на якість функціонування паливного елемента отримано із застосуванням фізичної моделі (експериментального зразку) паливного елемента.

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська робота складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний текст роботи викладений на 47 сторінках, містить 15 рисунків, 3 таблиці, список джерел з 29 найменувань. Загальний обсяг роботи, враховуючи додатки, складає 62 аркуші.

**Апробація результатів роботи:** Результати роботи представлено на XXIX Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства», 28-29 квітня 2022 р., м. Кременчук; Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції молодих учених та студентів «Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології», 18 листопада 2022 р., м. Київ та опубліковано в трьох тезах.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РІЗНОВИДІВ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

## 1.1 Призначення та область використання паливних елементів

Паливний елемент – електрохімічний генератор, який забезпечує пряме перетворення хімічної енергії на електричну. Відзначимо, що такі перетворення відбуваються і в електричних акумуляторах, однак паливні елементи мають дві важливі відмінності: по-перше, вони функціонують доти, доки паливо (відновник) та окиснювач надходять із зовнішнього джерела; по-друге, хімічний склад електроліту в процесі роботи не змінюється, тобто паливний елемент не треба перезаряджати [1].

Паливні елементи здійснюють перетворення хімічної енергії палива в електрику, минаючи малоефективні, що йдуть з великими втратами, процеси горіння. Це електрохімічний пристрій, який в результаті вискоефективного горіння палива безпосередньо виробляє електроенергію. Подібно існуванню різних типів двигунів внутрішнього згорання, існують різні типи паливних елементів, вибір відповідного типу паливного елемента залежить від його застосування [2]. Однією з характеристик паливних елементів є сила струму, яку паливний елемент здатний генерувати. Перший паливний елемент Бекона мав силу струму 13 міліампер з 1 см<sup>2</sup> зовнішньої поверхні електроду [3].

У 60-ті роки минулого століття були створені паливні елементи потужністю до 1 кВт для американських програм «Джеміні» та «Аполлон», у 80-ті – 10кіловатні для «Шаттла» та радянського «Бурану». У ті самі роки побудовано електростанції потужністю 100 кВт на основі фосфатнокислотних ПЕ. В Японії та США є дослідні 10мегаватні електростанції. Від 90х років і донині триває розробка паливних елементів потужністю від 1 кВт до 10 МВт для стаціонарної автономної енергетики. Крім того, тепер розробляються портативні джерела електроенергії (потужність менше 100 Вт) для комп'ютерів, стільникових телефонів,

фотоапаратів тощо. Як паливо у них використовується спирт - метанол, з якого одержують водень [6].

Паливний елемент складається з двох електродів, розділених електролітом, і систем підведення палива на один електрод та окисника – на другий, а також системи для видалення продуктів реакції (рис.1.1). В переважній більшості випадків з метою її прискорення використовують катализатори. Зовнішнім електричним колом паливний елемент з'єднаний із навантаженням, що й споживає електроенергію.

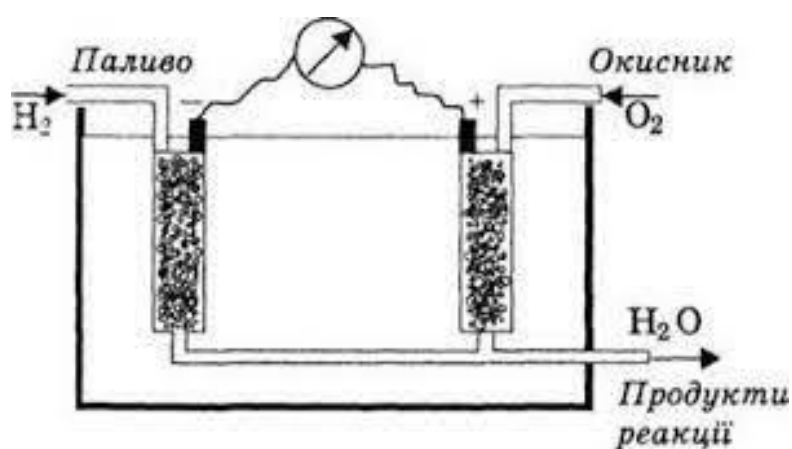


Рисунок 1.1 – Загальний принцип дії паливного елемента

Паливні елементи знайшли застосування [7]

- у мережах зв'язку, які потребують надійних рішень в області резервного електроживлення, та які можуть функціонувати протягом декількох годин або декількох днів в надзвичайних ситуаціях, якщо електромережа перестала бути доступною (наприклад, зарядні пристрої для армії);

- у системах безпеки. Найкращі ретельно розроблені системи безпеки будівель та системи зв'язку надійні лише настільки, наскільки надійно електроживлення, яке підтримує їх роботу. У той час як більшість систем включає деякі типи систем резервного безперебійного живлення для короткострокових втрат потужності, вони не створюють умови для більш тривалих перерв у роботі електромережі, які можуть мати місце після

стихійних лих або терактів. Це може стати критично важливим питанням для багатьох корпоративних і державних установ.

- у комунально-побутовому опаленні і електрогенерації для домашнього вироблення електрики до поставок електроенергії у віддалені райони, а також в якості допоміжних джерел живлення, у тому числі в мобільних пристроях та пристроях портативної електроніки, у тому числі електроніки побутового призначення (електронні книги, плеєри, ;

- на транспорті (електромобілі, морський транспорт; залізничний транспорт, гірська та шахтна техніка; допоміжний транспорт (складські навантажувачі, аеродромна техніка, підводні човни, морський транспорт) та бортовому живленні (авіація, космос).

Паливні елементи екологічно безпечні і мають ККД до 80%, тоді як двигуни внутрішнього згоряння забруднюють довкілля і ККД їх досягає не більше 30%. Паливні елементи не містять рухомих деталей і абсолютно безшумні [7]. Наприклад, в [2] описана оптимальна техніко-економічна багаторівнева стратегія управління енергією (EMS) мікромережі постійного струму, застосованої до комерційної будівлі. Запропонована енергосистема являє собою підключену до мережі мікромережу, що складається з системи паливних елементів (FC), фотоелектричної (PV) матриці та акумуляторної батареї. Взаємодія між різними типами джерел живлення може призвести до стабільності. Крім того, важливими факторами є забезпечення безперебійного та високоякісного джерела живлення, зниження експлуатаційних витрат і максимізація ефективності системи. Запропонований EMS складається з двох рівнів для мінімізації експлуатаційних витрат і забезпечення навантаження, а також іншого рівня керування, заснованого на теорії рівномірного керування для покращення якості електроенергії. Перший рівень базується на одній із наступних EMS: State Machine Control (SMC), Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) і External Energy Maximization Strategy (EEMS) – для підвищення ефективності та зменшення необхідної потужності. Другий рівень

заснований на економічному алгоритмі диспетчеризації (EDA) для зниження експлуатаційних витрат.

В паливному елементі протікає процес зворотного електролізу – за допомогою двох електродів, між якими знаходиться електроліт. На анод подається водень, а на катод – кисень. Для більш швидкого утворення іонів анод покривається каталізатором (ефективним рішенням є пориста платина). Каталізатор на аноді допомагає іонізувати водень, в результаті чого утворюються додатні іони водню і вільні електрони, які відправляються в зовнішнє електричне коло з навантаженням. Електрони із зовнішнього кола поступають до кисню на аноді і разом утворюють негативно заряджені іони. В цей час через електроліт від аноду до катоду рухаються позитивні іони водню. На стороні катоду іони об'єднуються, утворюючи воду, яка і є продуктом реакції. Принципова будова водневого паливного елемента зображена на рис.1.2.

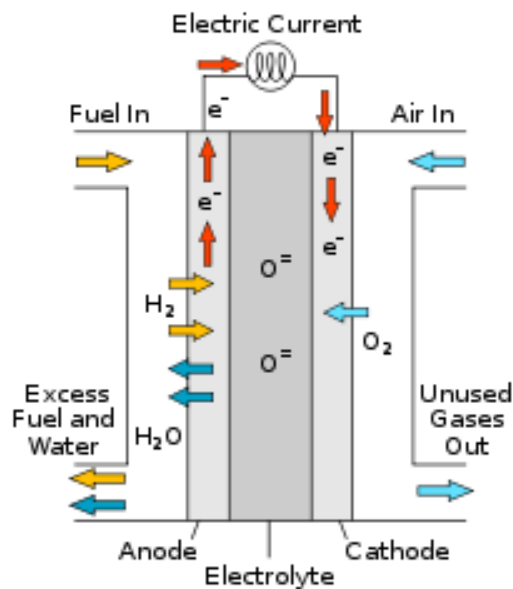


Рисунок 1.2 – Схема побудови водневого паливного елемента

Діапазон тиску для водню та кисню може бути досить широким і виступає регулятором потужності паливного елемента. Атоми водню мають

властивість вільно від'єднувати електрони. Їм досить незначного зовнішнього впливу для того, щоб стати іоном. Проте, реакція зміщена вліво, і основна частина водню перебуває у неіонізованому стані. Для зміщення реакції вправо використовують каталізатори, як правило, платину (для максимальної ефективності анод покривається пористою платиною). В результаті забезпечується легший вихід електрона з орбіти атома водню і його перехід на платиновий електрод.

Припустивши, що процес відбувається за звичайних умов і вся маса речовин бере участь у реакції, різниця потенціалів між електродами залежить тільки від активності реагентів (у даному випадку, коли йдеться про водень і кисень, вона становить близько 1,3 В). Напруга на електродах навантаженого паливного елемента знаходить на рівні 0,7 В. Отже можна зробити висновок, що в основі роботи паливної комірки лежить розділення шляху протікання складових палива (протон, електрон) до окисника, що забезпечується електролітом.

## **1.2 Різновиди паливних елементів**

Паливні елементи поділяються за видом електроліту (мембрани) та робочою температурою. Електроліт буває рідким або твердим, лужним, сольовим чи кислотним, а мембрана полімерною, керамічною, крім того вони мають бути іонопровідними при робочій температурі. Температура є вирішальним фактором для визначення сфери застосування.

До основних типів паливних елементів відносять [7]

- паливний елемент на твердому оксидному електроліті (Solid Oxid Fuel Cell (SOFC));
- паливний елемент на основі розплавленого карбонату (Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC));
- паливний елемент з прямим окисненням метанола (Direct Methanol Fuel Cell (DMFC));
- на основі фосфорної кислоти Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC);

- лужний паливний елемент (Alkaline Fuel Cell (AFC));
- паливний елемент з протонно-обмінною мембраною (Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)).

Тверді електроліти (рис.1.3) – це кристалічні, полікристалічні чи аморфні (склоподібні) матеріали, в яких іони певного знаку здатні рухатись під дією зовнішнього електричного поля, що забезпечує їм провідність в інтервалі ( $\sim 10^{-3} - 10$  См/см) в залежності від температури. Іонна складова загальної провідності твердих електролітів на 5-6 порядків вища за електронну, тобто числа переносу практично дорівнюють 1, а значення коефіцієнтів дифузії за порядком величини співставні зі значеннями розчинів сильних електролітів чи розплавів ( $10^{-5} - 10^6$  см<sup>2</sup>/с).

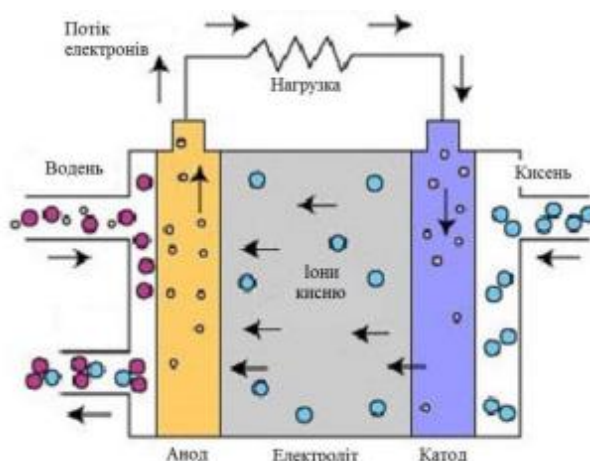


Рисунок 1.3 – Паливний елемент на твердому оксидному електроліті

PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Proton Exchange Membrane Fuel Cell) – паливний елемент з полімерною протонобмінною мембраною. В якості електроліту в таких паливних елементах використовується мембрана з полімеру товщиною приблизно в 2-7 аркушів звичайного паперу. Відновлювачем виступає чистий водень, причому максимально допустима частка домішок окису вуглецю – 10-100 мг/кг. Ці елементи працюють в доволі низьких температурах – до 100°C, мають високу щільність енергії, а також забезпечують можливість швидко змінювати



потужність. Для паливних елементів з протонобмінною мембраною характерна висока вихідна напругу – близько 0,7 В з однієї комірки. Серед всіх видів паливних елементів PEMFC знайшли сьогодні найбільше застосування: вони використовуються в транспорті (майже 100% всіх автомобілів, що працюють на водні), в якості первинних і резервних джерел енергії, в портативній електроніці. В даний час спостерігається стрімкий розвиток цієї технології, зокрема, в автомобільній галузі. У 2005 році близько 75% всіх стаціонарних установок, що працюють на водні з потужністю до 10 кВт були побудовані саме за технологією PEMFC. Великі установки можуть розвивати потужність до 300 кВт (General Motors).

DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) – паливні елементи з прямим окисненням метанолу (рис.1.4).

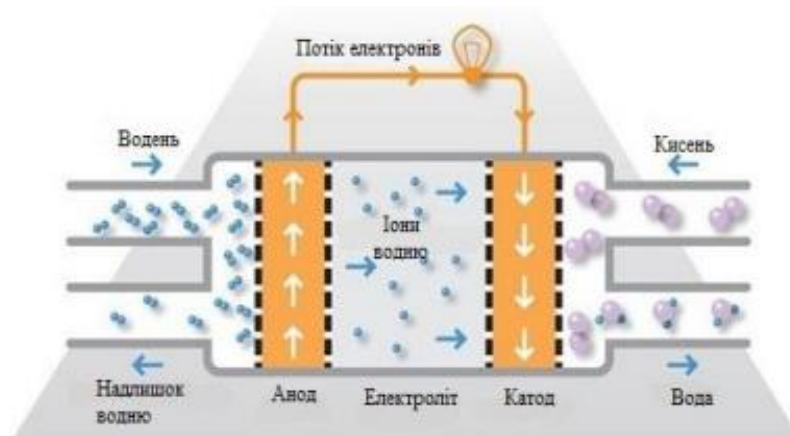


Рисунок 1.4 – Метанольний паливний елемент з протонобмінною мембраною

Паливні елементи цього класу є однією з реалізацій елементів з іонно-обмінною мембраною. У них використовується той же електроліт, що і в найбільш поширених PEMFC, але паливо замінене з чистого водню на водний розчин метилового спирту (метанол). Головна перевага паливних елементів з прямим окисненням метанолу в порівнянні з водневими елементами з протонобмінною мембраною – можливість використання метанолу в рідкому вигляді, який більш вигідний для збереження і транспортування, ніж водень. На відміну від інших технологій, в яких

використовується рідина замість газу, в DMFC немає необхідності в застосуванні зовнішнього конвертора для отримання чистого водню і здійснення процесу «реформінгу», оскільки виділення водню з метанолу відбувається безпосередньо в електроліті.

DEFC етаноловий паливний елемент – можна виробляти з харчових культур (наприклад, цукрової тростини, кукурудзи, буряк тощо), неїстівні частини харчових рослин або іншу біомасу таких джерел, як стрич, тополя та лісові відходи. Співвідношення вихідної/вхідної енергії є співвідношенням вміст енергії в етанолі до вмісту енергії у вичопному паливі використовується для виробництва етанолу з відповідної біомаси (тобто енергії використовується на фермі, за винятком сонячної енергії, для транспортування біомаси на заводі та на заводі з виробництва етанолу). Як наприклад, етанол, вироблений із кукурудзи на заводі з сухого подрібнення етанолу що використовували вичопне паливо для теплової енергії та електрики, а продають сухим зерно дистилятора може досягти співвідношення вихідної енергії/витрати .

AFC (Alkaline Fuel Cell) – лужні паливні елементи. В якості електроліту в лужних елементах використовується концентрований гідроксид калію (KOH) або його водний розчин, а основним матеріалом для виготовлення електродів є нікель (рис.1.5).

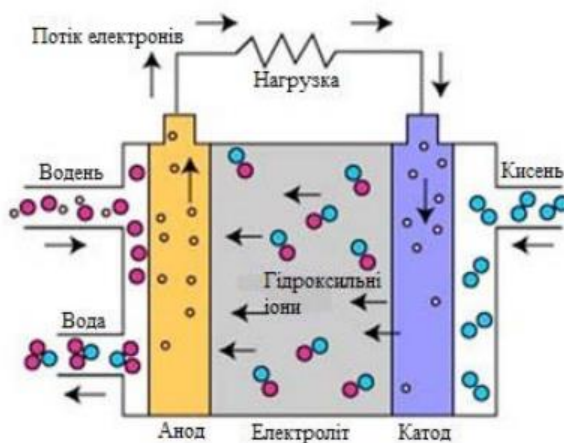


Рисунок 1.5 – Лужний паливний елемент

Лужні елементи значно (приблизно на порядок) поступаються PEMFC за питомою потужністю (густина струму в таких паливних комірках сягає  $1 \text{ A/cm}^2$ ), внаслідок чого їх габарити (при приблизно однакових характеристиках) значно більше. У традиційних лужних паливних елементах в якості палива повинен використовуватися чистий водень, а як окисник – чистий кисень. В цьому і полягає їх основний недолік – вміст у паливі або окисники домішок двоокису вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) призводить до карбонізації лугу.

На даний момент використовуються системи циркуляції електроліту з газоочисниками з натрового вапна. Це дозволяє знизити карбонізацію електроліту і сприяє відведенню надлишку тепла.

Система циркуляції дає наступні переваги:

- відсутнє пересихання комірок; – покращене охолодження;
- карбонати легко видаляються з електроліту;
- градієнт концентрації  $\text{OH}^-$  значно зменшений;
- в комірці не накопичуються бульбашки.

Перевагами всього класу паливних елементів з лужними електролітом є:

- низька собівартість виробництва;
- можливість використання більш дешевих нікелевих і срібних каталізаторів;
- швидкі реакції на катоді;
- абсолютна екологічна чистота гарячої води, одержуваної в якості відходів.

Недоліки лужних паливних елементів:

- карбонізація лугу при використанні повітря;
- високі вимоги до чистоти водню;
- малий ресурс.

PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) – паливний елемент, в якому в якості електроліту використовується рідка фосфорна кислота. Паливні елементи на

основі фосфорної (ортофосфорної) кислоти стали першими паливними елементами для комерційного використання (рис.1.6). Даний процес був розроблений у середині 1960-х р. Такі паливні елементи виробляють теплоту чи електроенергію з ККД більше 50%, а робочі температури знаходять в межах 90...250°C. РАFC застосовуються на великих стаціонарних об'єктах (до 11 МВт). Працюють ці паливні елементи на водні, однак, вимоги по його чистоті значно менш суворі, ніж в разі використання протонобмінної мембрани в якості електроліту. У більшості випадків водень отримують з природного газу або біогазу. ККД по електроенергії оцінюється в 37-42% , а при використанні відведеної теплової енергії – 85%. Пористі електроди виготовляються із суміші каталізаторів і вуглецевополімерної зв'язки. Корозійна стабільність аноду досягається високотемпературною обробкою, при цьому корозія зменшується на два порядки при напрузі 0,8 В у 97%  $H_3PO_4$  при температурі 190°C і тиску 4,8 атм.

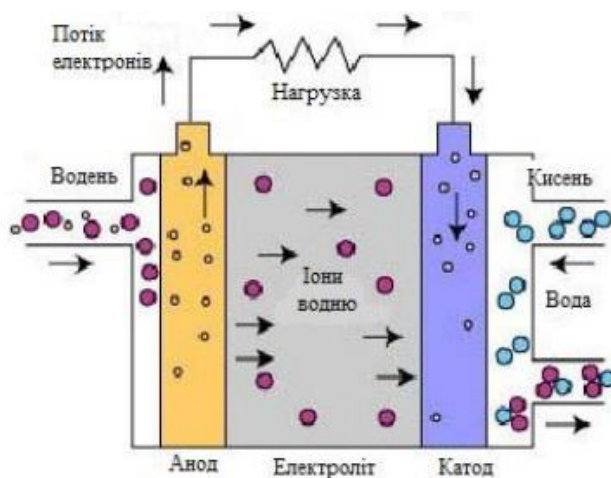


Рисунок 1.6 – Паливний елемент на основі ортофосфорної кислоти

SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) – паливний елемент з твердим керамічним електролітом. Відмінність від раніше розглянутих видів полягає в значно вищих робочих температурах (700-1000 С) і різноманітності використовуваного палива: природний газ, водень, пропан, біогаз, інші вуглецевмісні речовини. ККД електрохімічного перетворення – 50%, з

урахуванням теплової енергії – до 80%. Основною сферою застосування цієї технології вважається виробництво джерел електричної і теплової енергії для різних приміщень. Також ведуться розробки систем промислового використання. SOFC широко застосовуються в якості первинних і портативних резервних джерел енергії великої ємності. Останнім часом ведуться розробки по використанню SOFC в автомобільній промисловості, проте, на відміну від паливних елементів на основі протонобмінних мембран мова йде тільки про допоміжні системи живлення, а не про основний силовий агрегат. Говорячи про великі об'єми енергії, є досвід виробництва комерційних установок потужністю 1 МВт.

### **1.3 Приклади використання паливних елементів в пристроях побутової електроніки**

В межах даної кваліфікаційної роботи основний акцент будемо робити на використанні паливних елементів для побутових приладів електронної техніки, що можуть використовуватися для [14]:

- розваги (телевізори, програвачі, електронні книги, радіоприймачі тощо);
- комунікації (мобільні телефони, зарядні пристрої, ноутбуки, принтери, подрібнювачі паперу тощо);
- відпочинку та роботи (цифрові фотоапарати, GPS-пристрої, відеокамери, відеоігрові приставки, картриджі ПЗУ, автомобілі з дистанційним управлінням, набори роботів тощо).

Паливні елементи, як свідчить рис. 1.7, мають більш високі показники питомої потужності (на одиницю маси) у порівнянні з акумуляторними батареями. У той самий час, поступаються двигунам внутрішнього згорання. Паливні елементи можуть заповнити прогалину між акумуляторними батареями та двигунами.

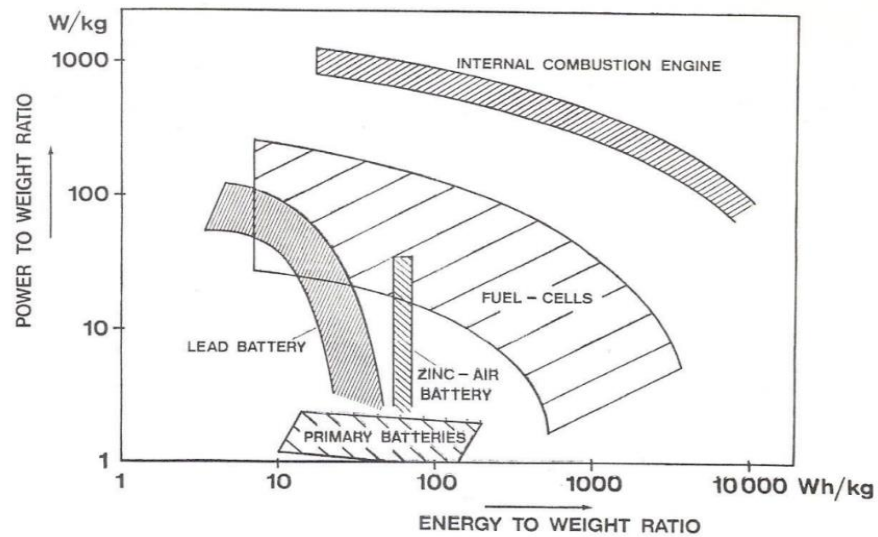


Рисунок 1.7 – Порівняння питомих енергетичних показників паливних елементів, акумуляторних батарей та двигунів внутрішнього згорання

Використання паливних елементів для живлення мобільних пристроїв портативної електроніки розглянемо на прикладі зарядного пристрою PowerTrek, який є джерелом живлення для мобільних телефонів та інших пристроїв електронних побутових пристроїв (рис.1.8)[8].



Рисунок 1.8 – Зарядний пристрій на паливних елементах PowerTrek

PowerTrek - це легкий кишеньковий зарядний пристрій для людей, які тривалий час не мають доступу до електромережі. На відміну від інших портативних зарядних пристроїв, PowerTrek миттєво та надійно працює незалежно від місця, що робить його ідеальним для прихильників активного відпочинку та промислових споживачів на ринках, що розвиваються [8].

Пристрій PowerTrek використовує технологію водневих паливних елементів, які екологічно чисто і ефективно перетворюють водень в електрику. Завдяки міцному водонепроникному корпусу та надійної технології роботи, PowerTrek здатний задовольнити найвищі вимоги. PowerTrek – це водночас портативний акумулятор і паливний елемент. Портативний акумулятор може незалежно працювати в якості готового джерела живлення або для проміжного зберігання енергії при роботі паливного елемента. Паливний елемент робить можливою миттєву зарядку від розрядженого акумулятора, не вимагаючи попередньої її зарядки від електромережі. Досить просто вставити паливний резервуар і додати воду. Для зарядки портативних пристроїв, наприклад, мобільних телефонів, фотоапаратів та GPS-пристроїв, слід підключити пристрої до Power Trek через USB порт.

PowerTrek має конкурентну перевагу перед традиційними портативними зарядними пристроями. На відміну від сонячних батарей, енергія в паливних елементах генерується миттєво, і на зарядку не впливає ні погода, ні положення сонця. У порівнянні з дорожніми зарядними пристроями на батареях, PowerTrek виграє за рахунок надійності, адже паливний резервуар не розряджається, на відміну від батарей [8]. Розробником PowerTrek є шведська компанія myFC, що займається паливними елементами та вирішенням проблем живлення портативної електроніки. Компанія myFC отримала численні патенти на розроблену гнучку систему паливних елементів з рекордною питомою потужністю. PowerTrek став першим комерційним портативним зарядним пристроєм, що використовує технологію myFC. Оскільки водневе паливо може бути



отримане з кількох альтернативних джерел, система відноситься до "Flexifuel". Хімічний процес безпечний та екологічно чистий, а єдиним побічним продуктом при роботі паливних елементів є невелика кількість водяної пари.

Київський національний університет технологій та дизайну підтримує партнерські відносини в рамках договору про співпрацю із Кооперативним державним університетом Баден-Вюртемберг (DHBW) у Штутгарті (Німеччина). Університет в Німеччині займається розробками в області паливних елементів. На рис.1.9, 1.10 представлені розроблені в DHBW пристрої на метанолових паливних елементах:

- рис.1.9 – мини електромобіль;
- рис.1.10 – безпілотний літаючий апарат.

Транспортні засоби на паливних елементах можуть досягти разового пробігу від 350 до 1200 кілометрів, а загальний ресурс досягає 500 тис. кілометрів. Легкові автомобілі можуть заправлятися за 3-5 хвилин, мають діапазон пробігу до 500 км і загальний пробіг за термін служби більше 200 тис. км [13].



Рисунок 1.9 – Міні-електромобіль побутового призначення  
DHBW MINI MOKE





Рисунок 1.10 – Безпілотний літаючий апарат DHBW HYFLY  
на паливних елементах

Функція мікробів у паливному елементі полягає в тому, щоб каталізувати реакцію, яка включає перетворення хімічної речовини енергії в електричну енергію. Метаболічні процеси цих мікроорганізмів виробляють електрони шляхом окислення джерела вуглецю, який у багатьох застосуваннях є вуглеводним мономером. Електрони, що генеруються на аноді, можуть потім проходити через зовнішню ланцюг для виробництва енергії. Ці електрони потрапляють на катод, щоб об'єднатися з протонами ( $H^+$ ), які переходять через PEM і зв'язується з киснем, що надається ззовні, утворюючи воду (рис.1.11).



Рисунок 1.11 - Експериментальна установка із запасною мембраною  
картонної коробки для яєць

В Україні впровадженням паливних елементів займається, наприклад, компанія «ЕЛМІЗ» [13]. Як приклад, на рис.1.11 наведений метаноловий паливний елемент Elmiz Н-200 PEM потужністю 200 Вт повітряним охолодженням, який відрізняється підвищеною компактністю.



Рисунок 1.11 – Паливний елемент типу Elmiz 200 PEM

#### **1.4 Постановка задачі дослідження**

Як показав аналітичний огляд, існує багато типів паливних елементів, але всі вони складаються з анода, катода та електроліту. Анод і катод містять каталізатори, які викликають реакції окислення палива та які утворюють позитивно заряджені іони водню та електрони. Іони водню втягуються через електроліт після реакції. У той же час електрони забираються з анода до катода через зовнішній ланцюг, виробляючи електроенергію постійного струму. На катоді іони водню, електрони і кисень реагують з утворенням води. Оскільки основною різницею між типами паливних елементів є електроліт, паливні елементи класифікуються за типом електроліту, який вони використовують, і за різницею в часі запуску в діапазоні від однієї секунди для паливних елементів з протонною обмінною мембраною (паливні елементи PEM або PEMFC) до 10 хвилин для твердооксидних паливних елементів (SOFC). Паливний елемент, який використовує водень як паливо, має високу продуктивність, але потребує використання водню високого ступеня чистоти і електроди з платини. Отже, це досить дорого.

Паливні елементи поділяються на два види спиртових паливних елементів: прямий метанольний паливний елемент (DMFC) і етаноловий паливний елемент (DEFC). Є багато досліджень з вивчення та розробки паливних елементів прямого метанолу. Однак метанол є невідновлюваним джерелом енергії та дуже токсичним. Паливні елементи на етанолі менш токсичні та мають більш високу щільність енергії. Так, питома енергія етанолу складає 8,0 кВт·год/кг, а метанолу – 6,1 кВт·год/кг. Етанол можна отримати у великих кількостях з біомаси через процес бродіння з відновлюваних ресурсів, таких як цукрова тростина, пшениця, кукурудза або навіть солома. Застосування етанолу також пододало б проблеми зберігання та інфраструктури водню для застосувань на паливних елементах. З підвищенням концентрацій етанолу за об'ємом, концентрація реагентів у місцях реакції збільшується, тому електрохімічна швидкість також зростає, але коли він досягає точки насичення, продуктивність поступово падає. З огляду на це, в магістерській роботі були обрані паливні елементи на основі етанолу для використання в якості джерел живлення невеликих за розміром портативних електронних пристроїв.

## **2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

### **2.1 Загальна характеристика методів наукових досліджень**

Науковий метод (або методи наукового дослідження) – сукупність методів встановлення параметрів, структури, інших характеристик досліджуваних об'єктів [23].

Метод включає в себе способи дослідження феноменів, систематизацію, коригування нових і отриманих раніше знань. Висновки робляться за допомогою правил і принципів міркування на основі емпіричних (спостережуваних і вимірюваних) даних про об'єкт. Базою для отримання даних є спостереження та експерименти. Для пояснення спостережуваних фактів висуваються гіпотези і будуються теорії, на підставі яких формулюються висновки та припущення. Отримані прогнози перевіряються експериментом або збором нових фактів [23].

Важливою стороною наукового методу, його невід'ємною частиною для будь-якої науки, є вимога об'єктивності, що виключає суб'єктивне тлумачення результатів. Не повинні прийматися на віру будь-які твердження, навіть якщо вони виходять від авторитетних учених. Для забезпечення незалежної перевірки проводиться документування спостережень, забезпечується доступність для інших вчених всіх вихідних даних, методик і результатів досліджень. Це дозволяє не тільки отримати додаткове підтвердження шляхом відтворення експериментів, але й критично оцінити ступінь адекватності (валідності) експериментів і результатів по відношенню до перевіреної теорії. Спеціальні методи дослідження ґрунтуються на вивченні конкретних фізичних та хімічних властивостей речовини й фізичних властивостей та параметрів фізичних полів [16].

Існують такі наукові методи:

1. Теорія (грец. θεωρία, «розгляд, дослідження») — система знань, що має характер передбачення відносно якого-небудь явища. Теорії формуються, розробляються і перевіряються згідно з науковим методом.

Стандартний метод перевірки теорій — пряма експериментальна перевірка («експеримент — критерій істини»). Однак часто теорію не можна перевірити прямим експериментом (наприклад, теорію про виникнення життя на Землі), або така перевірка занадто складна або затратна (макроекономічні та соціальні теорії), і тому теорії часто перевіряються не прямим експериментом, а по наявності характеру передбачення – тобто якщо з неї випливають невідомі / непомічені раніше події, і при пильному спостереженні ці події виявляються, то характер передбачення присутній.

2. Гіпотеза (від грец. ὑπόθεσις — «основа», «припущення») — недоведене твердження, припущення або здогад.

Як правило, гіпотеза висловлюється на основі ряду спостережень, які її підтверджують і тому виглядає правдоподібно. Гіпотезу згодом або доводять, перетворюючи її у встановлений факт (див. теорема, теорія), або ж заперечують (наприклад, вказуючи контрприклад), переводячи в розряд помилкових тверджень.

Недоведена і неспростована гіпотеза називається відкритою проблемою.

3. Моделювання — це вивчення об'єкта за допомогою моделей з перенесенням отриманих при цьому знань на оригінал. Види:

- Предметне моделювання-створення моделей зменшених копій з певними дублюючими оригінал властивостями.
- Уявне моделювання-з використанням уявних образів.
- Знакове чи символічне-являє собою використання формул, креслень.

4. Експеримент (від лат. experimentum — проба, досвід) у науковому методі — набір дій і спостережень, які виконуються для перевірки

(істинності чи хибності) гіпотези або наукового дослідження причинних зв'язків між феноменами. Експеримент є наріжним каменем емпіричного підходу до знання. Критерій Поппера називає головною відмінністю наукової теорії від псевдонаукової можливість постановки експерименту, передусім такого, який у результаті може спростувати цю теорію[5].

Експеримент поділяється на такі етапи:

- Збір інформації;
- Спостереження явища;
- Аналіз;
- Вироблення гіпотези, щоб пояснити явище;
- Розробка теорії, що пояснює феномен, заснований на

припущеннях, у ширшому плані.

5. Наукове дослідження — процес вивчення, експерименту, концептуалізації та перевірки теорії, пов'язаний з отриманням наукових знань.

Види досліджень:

- Фундаментальне дослідження, розпочате головним чином, щоб виробляти нові знання незалежно від перспектив застосування.

- Прикладне дослідження.

6. Спостереження — це цілеспрямований процес сприйняття предметів дійсності. Результати його фіксуються в описах:

- безпосереднє спостереження-здійснюється без застосування технічних засобів.

- опосередковане з використанням тех. пристроїв.

Для отримання значущих результатів необхідно багаторазове спостереження.

7. Вимірювання — це визначення кількісних значень, властивостей об'єкта з використанням спеціальних технічних пристроїв та одиниць вимірювання [20].

Усі методи наукових пізнань поділяються на загальні та спеціальні. Загальні методи використовуються протягом всього дослідження, незалежно від галузі знань і особливостей дослідження.

Загальні методи:

група А – емпіричні методи дослідження;

група Б – методи, які використовуються як на емпіричному, так і на теоретичному рівнях дослідження;

група В – теоретичні методи дослідження.

Емпіричні методи, як правило, застосовуються на етапі збору необхідних даних. Як усі методи збору вони досить прості у виконанні і можуть застосовуватись у будь-яких напрямках. Спостереження дає змогу не вдаватися до суцільного дослідження (обстеження), отримати узагальнюючі дані, які дозволяють правомірно відобразити характеристики всієї сукупності предметів або явищ [17].

Сукупність поділяється на: генеральну; вибіркову.

При спостереженні науковці використовують відносні та середні показники. Відносні показники можуть бути часткою або питомою вагою цілого, середні величини необхідні для визначення середнього значення варіюючої ознаки всієї сукупності.

Порівняння дає змогу встановити подібність і розходження предметів та явищ дійсності, а також встановити загальне у порівнюваних об'єктів та особливості і властивості, які притаманні кожному з предметів або явищ[22].

Головні вимоги до застосування методу:

1. порівнювати слід ті явища, між якими може існувати визначена об'єктивна спільність;

2. порівняння має здійснюватися за найбільш важливими істотними ознаками.

Метод вимірювання є процедурою визначення числового значення певної величини за допомогою одиниці виміру. Експеримент – це метод наукового дослідження, який припускає втручання у природні умови

існування предметів і явищ, відтворює визначені сторони предметів і явищ у спеціально створених умовах з метою вивчення їх без супутніх обставин. Сутність методу абстрагування полягає в уявному відволіканні від несуттєвих властивостей і зв'язків та предметів і в одночасному виділенні та фіксуванні однієї чи кількох сторін, що становлять об'єкт дослідження. Аналіз є методом наукового дослідження шляхом розкладання предмета на складові.

Математичне моделювання є методом наукового дослідження, який базується на пізнанні досліджуваних процесів (об'єктів) за допомогою математичної моделі (шляхом розв'язання співвідношень його математичної моделі). Цей метод ґрунтується на математичній подібності. У математично подібних об'єктів процеси мають різну фізичну природу, але описуються ідентичними математичними співвідношеннями. Як для розглянутого прикладу, так і для багатьох інших випадків практика наукових досліджень підтверджує, що цілком правомірно представляти досліджуваний процес на моделі, у якій відбувається інший за своєю природою процес, якщо математичні описи цих процесів[22].

Класифікація об'єктів і моделей за єдністю природи процесів. Динамічним об'єктам відповідають математичні моделі динаміки, які являють собою одне або декілька (систему) звичайних диференціальних рівнянь (за часом) першого й вище порядків. Ці диференціальні рівняння складаються на підставі фізичних законів, що дозволяють описати перехід об'єкта із одного стану спокою в інший під впливом зовнішніх факторів або зміни внутрішніх параметрів і є універсальним видом опису динамічної характеристики об'єкта, яка залежить одночасно від властивостей об'єкта й від закону зміни вхідних впливів [15].

*Лінійні й нелінійні об'єкти й моделі, лінеаризація.* Якщо залежність вихідної величини об'єкта від вхідної в усталеному режимі (статична характеристика) має лінійний вигляд (тобто може бути графічно представлена прямою лінією), то такий об'єкт називається лінійним і може



бути представлений лінійною статичною або динамічною моделлю. Під лінеаризацією розуміється заміна нелінійної функціональної залежності лінійною в певному інтервалі зміни або на межах деякого значення (робочої точки) вихідної змінної. Лінеаризація статичної характеристики на практиці часто припустима, оскільки відхилення вихідної змінної в реальних умовах роботи від робочих значень незначні[15].

*Стаціонарні й нестаціонарні моделі та об'єкти.* Якщо реакція об'єкта (характер зміни вихідної змінної) на будь-який заданий тип вхідного впливу не залежить від моменту початку дії, а лише від інтервалу часу його дії, то такий об'єкт називається стаціонарним. Практично це означає, що в який би момент часу (через годину, місяць, рік) ми не подали деякий фіксований сигнал на вхід об'єкта, характер зміни вихідного сигналу повинен залишатися незмінним. Більшість об'єктів природи (особливо об'єкти хімічної технології) нестаціонарні за своєю фізичною сутністю. Це пов'язане з тим, що із часом з більшою або меншою інтенсивністю змінюються всі або деякі параметри об'єкта (наприклад, через появу накипу зменшується коефіцієнт теплопровідності трубок теплообмінника, «старіє» каталізатор і т.п.). Однак швидкість зміни параметрів може бути різною. Якщо на досліджуваному інтервалі часу параметри об'єкта змінюються незначно, так, що цією зміною можна знехтувати, то такий об'єкт можна вважати стаціонарним. Такі об'єкти й відповідні їм моделі називаються квазістаціонарними.

*Детерміновані і стохастичні об'єкти та моделі.* За відсутності або наявності незначних збурень в об'єктах визначити вплив вхідних змінних на вихідні можна однозначно. Якщо збурення великі і вносять значні спотворення в характер зв'язків в об'єкті, то навіть при відомому характері зміни управляючих змінних не можна говорити про їх точний вплив на виходи, а лише про деякий припустимий вплив, оскільки такі збурення, як правило, є випадковими[16].

Математична модель – детермінована. Безперервні й дискретні об'єкти та моделі. Якщо вихідна змінна об'єкта визначена для будь-якого моменту

часу, то такий об'єкт і відповідна йому математична модель називаються безперервними. У дискретних об'єктах і відповідних їм математичних моделях вихідна змінна визначена (відома) тільки в деякі фіксовані моменти часу. Безперервні математичні моделі описують тільки безперервні об'єкти й процеси, а дискретні моделі використовуються для опису як безперервних, так і дискретних об'єктів.

*Об'єкти й моделі із зосередженими та розподіленими параметрами.*

Якщо вихідні змінні об'єкта змінюються в часі однаково в усіх його точках (говорять розподілені) або певною нерівномірністю з достатньою для практики похибкою можна знехтувати, то такі об'єкти й відповідні їм математичні моделі називають об'єктами й математичними моделями із зосередженими параметрами. Для математичного опису таких об'єктів використовують тільки звичайні диференціальні рівняння (безперервні або кінцево-різницеві). Якщо значення вихідних змінних у різних точках об'єкта суттєво відрізняються і це важливо з погляду моделювання, то такі об'єкти й відповідні їм математичні моделі називають об'єктами й математичними моделями з розподіленими параметрами. Для їхнього математичного опису використовуються диференціальні рівняння в частинних похідних. В об'єктах із розподіленими параметрами зміна вихідної змінної може відбуватися як за координатами, так і в часі. Математичні моделі на мікрорівні відображають окремі фізичні процеси, явища. Математичні моделі на макрорівні описують технологічні процеси. Математичні моделі на метарівні описують технологічні системи (ділянки, цехи, підприємство в цілому). Структурні математичні моделі призначені для відображення структурних властивостей об'єктів. Наприклад, у САПР ТП для представлення структури технологічного процесу, расцеховки виробів використовуються структурно-логічні моделі. Функціональні математичні моделі призначені для відображення інформаційних, фізичних, часових процесів, що протікають у працюючому устаткуванні, у ході виконання технологічних процесів і т.д.

Аналітичні математичні моделі являють собою математичні вирази вихідних параметрів як функцій від вхідних та внутрішніх параметрів[19].

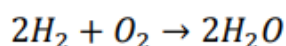
Аналітичні моделі є ефективним інструментом для рішення задач оптимізації процесів, що протікають у технологічних системах, а також оптимізації й обчислення характеристик самих технологічних систем. Важливим моментом є складність конкретної аналітичної моделі. Часто для реальних технологічних систем (автоматичних ліній, гнучких виробничих систем) складність їхніх аналітичних моделей настільки велика, що одержання оптимального рішення виявляється дуже громіздким з обчислювальної точки зору. Для підвищення обчислювальної ефективності в цьому випадку використовують різні прийоми.

## **2.2 Теоретичні підходи до опису паливних елементів типу DEFC/DMFC**

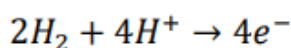
Розглянемо основні підходи та співвідношення, що використовуються для опису паливних елементів прямого етанолу (DEFC).

### 2.2.1 Хімічна реакція.

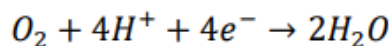
Загальна реакція (рис.2.1):



Анод:



Катод:



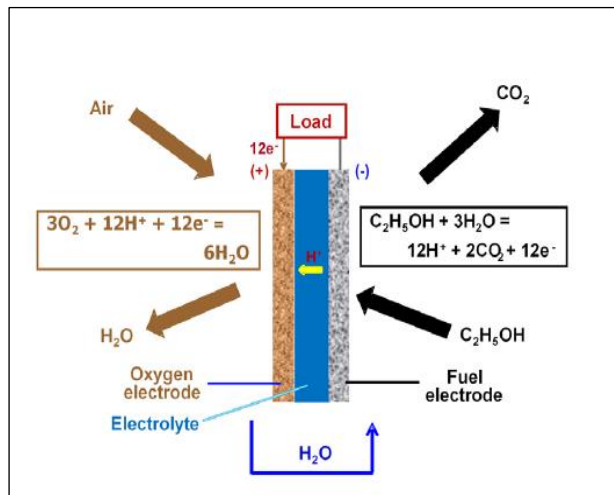


Рисунок 2.1 – Трансфер електронів в DEFC

### 2.2.1 Стандартний потенціал клітини

Максимальний клітинний потенціал при повному утворенні:

$$U_{th} = -\frac{\Delta H}{n \cdot F} ; \quad Q^* = n \cdot F \quad (2.1)$$

де  $\Delta H$ : утворення

$n$ : кількість переданих електронів (DMFC = 12)

$F$ : постійна Фарадея 96,485,33 Ас/моль

$Q^*$ : молярна швидкість заряду

Для зворотного клітинного потенціалу необхідно відняти ентропію утворення:

$$U_{Rev} = -\frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{n \cdot F} = -\frac{\Delta G}{n \cdot F} \quad (2.2)$$

де  $T$ : Температура

$\Delta S$ : Ентропія формування

$\Delta G$ : Ентальпія вільної реакції

Таблиця 2.1 – Ентальпія утворення та ентальпія вільної реакції

	Умова 298,15K 1013mbar	$\Delta H$ [kg/mol]	$\Delta G$ [kg/mol]
<b>H<sup>+</sup></b>	l	0	0
<b>O<sub>2</sub></b>	g	0	0
<b>CO<sub>2</sub></b>	g	-393,5	-394,38
<b>H<sub>2</sub>O</b>	g	-242	-234,60
<b>H<sub>2</sub>O</b>	l	-286	-237,20
<b>Ethanol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub> OH</b>	l	-277,65	-174,77
<b>CH<sub>3</sub>OOH</b>	l	-424,72	-295,77

**Ентальпія** (теплова функція) – термодинамічний потенціал, що характеризує стан термодинамічної системи при виборі як основних незалежних змінних ентропії і тиску. **Ентропія** — фізична величина, яка використовується для опису термодинамічної системи.

Рівняння Гіббса-Гельмгольца:

$$\Delta G = \Delta H^0 - T\Delta S^0$$

$$\Delta H^0 = \sum_i v_{i,E} \Delta H_{i,E}^0 - v_{i,A} \Delta H_{i,A}^0 \quad (2.3)$$

$$\Delta S^0 = \sum_i v_{i,E} \Delta S_{i,E}^0 - v_{i,A} \Delta S_{i,A}^0$$

де А: Вихідна речовина

Е: кінцева речовина

### 2.2.2 Теплова ефективність

Теплова ефективність визначається:

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H^0} = \frac{U_{Rev}}{U_{th}} \quad (2.4)$$

$$\eta_{th} = 97\%$$

Ефективність DEFC можна розрахувати наступним чином:

$$\eta_{eff} = \eta_{th} \cdot \eta_U \cdot \eta_I \quad (2.5)$$

ККД за напругою:

$$\eta_U = \frac{U_{Cell}}{U_{Rev}} = -\frac{n \cdot F}{\Delta G} \cdot U_{Cell} \quad (2.6)$$

Фарадичну або струмову ефективність реакції паливного елемента можна визначити як відношення фактичної кількості електронів, залучених у реакцію окислення, до теоретичної кількості електронів, залучених у повну реакцію окислення палива.

$$\eta_I = \frac{n_{actual}}{n_{theor}} \quad (2.7)$$

Розрахунки показують, що фарадівська ефективність окислення етанолу може змінюватися від 33% до 100% відповідно для 4 електронів при частковому окисленні до оцтової кислоти та 12 електронів для повного окислення до CO<sub>2</sub>.

Температурна залежність

$$\left(\frac{\partial U_{Rev}}{\partial T}\right)_p = -\frac{1}{n \cdot F} \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_p = \frac{\Delta S^0}{n \cdot F} < 0 \quad (2.8)$$

Залежність від тиску

$$\left(\frac{\partial U_{Rev}}{\partial p}\right)_T = -\frac{1}{n \cdot F} \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial p}\right)_T = \frac{\Delta V}{n \cdot F} > 0 \quad (2.9)$$

Розрахунок напруги в одній комірці DEFC для портативних електронних пристроїв[13]

$$E_{cell} = E_{cell}^0 - n_{conc} - n_{ohmic} - n_{act} \quad (2.10)$$

де  $E_{cell}$ : напруга паливного елемента (В)

$E_{cell}^0$ : напруга паливної комірки відповідає теорії (V)

$n_{conc}$ : концентрація втрат напруги, пов'язана з кінетикою реакції

$n_{ohmic}$ : втрата опору ( $\Omega$ )

$n_{act}$ : реакція втрати напруги, пов'язана з кінетикою

Розрахунок концентраційних втрат напруги, пов'язаних з кінетичною реакцією

Переміщення підкладки на анодному шарі каталізатора та шарі катодного каталізатора призводить до концентрації втрат усередині; розрахунок концентрації втрати клітин за рівнянням[28]

$$n_{conc} = \frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{I_{lim}}{I_{lim}-i}\right) \quad (2.11)$$

де  $R$  = універсальна газова стала = 8,314 (Дж/Г моль·к)

$z$  = кількість електронів у системі

Розрахунок втрат опору ( $\Omega$ )

$$\eta = iR_{total}$$

$$R_{total} = \eta_{membr} + \eta_{contact}$$

$$\eta_{membr} = \frac{Lm}{K_m^0} i$$

$$\eta_{contact} = \frac{Lm + 2Lc}{K_S}$$

Розрахунок реакції втрати напруги, пов'язаної з кінетичною реакцією [29]

$$\eta_{act.anode} = \frac{RT}{\alpha_a z_a F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (2.12)$$

$$\eta_{act.cathode} = \frac{RT}{\alpha_c z_c} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (2.13)$$

З рівняння 2.10 ми можемо обчислити напругу в одній комірці DEFC

$$E_{cell} = E_{cell}^0 - n_{conc} - n_{ohmic} - n_{act}$$

$$E_{cell} = E_{cell}^0 - \left(\frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{I_{lim}}{I_{lim}-i}\right)\right) - \left(i\left(\frac{Lm}{K_m} + \frac{Lm+2Lc}{K_S}\right)\right) - \left(\frac{RT}{\alpha_a z_a F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) + \frac{RT}{\alpha_c z_c} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right)\right)$$

Розрахунок повної потужності

Електричну потужність можна розрахувати за наступним рівнянням

$$P = V \times I \quad (2.15)$$

Таким чином, в цьому підрозділі розглянуто основні теоретичні співвідношення, що знаходять використання для опису паливних елементів прямого етанолу.

### **2.3 Обґрунтування вибору методу досліджень паливних елементів типу DEFC**

Основними робочими показниками паливних елементів є енергетичні показники, зокрема напруга, що генерується паливним елементом, електрична потужність, а також вартісні показники. Оцінювання цих показників можна проводити за допомогою наведених вище математичних моделей (аналітичних виразів). Однак розрахунок паливних елементів з використанням аналітичних моделей достатньо складний, до того ж, як правило, не всі змінні, що входять до формул, відомі на початку розрахунків.

Для паливного елемента типу DEFC важливо дослідити вплив концентрації етанолу та температури функціонування паливного елемента на енергетичні характеристики – струм, напругу та електричну потужність у вихідному колі паливного елемента. Найбільш достовірну та повну картину стосовно впливу зазначених факторів на якість функціонування паливного елемента можна отримати із застосуванням фізичної моделі (експериментального зразку) паливного елемента[27].

Експериментальний метод знайшов широке застосування при дослідженні етанольних паливних елементів та показав свою ефективність, що відображено в чисельних наукових публікаціях [26].



Для проведення експериментальних досліджень паливного елемента типу DEFC була розроблена програма, згідно якої передбачалось:

- спроектувати та виготовити експериментальний зразок (фізичну модель) паливного елемента;

- провести аналіз впливу концентрації етанолу на струм, напругу та електричну потужність у вихідному колі паливного елемента;

- визначити зміни робочої температури на продуктивність виробництва електроенергії паливним елементом;

- розробити рекомендації щодо можливостей використання паливних елементів типу DEFC для живлення малогабаритних (портативних) електронних пристроїв побутового призначення.

В рамках даної магістерської роботи опис фізичної моделі паливного елемента типу DEFC та експериментальні дані для аналізу режимів його роботи в умовах впливу різних факторів були надані проф. Вольфом Бургером з Кооперативного державного університету Баден-Вюртемберг (Штутгарт, Німеччина).

## 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТУ ТИПУ DEFC

### 3.1 Опис експериментальної установки

В рамках даної магістерської роботи опис фізичної моделі паливного елемента типу DEFC та експериментальні дані для аналізу режимів його роботи в умовах впливу різних факторів були надані проф. Вольфом Бургером з Кооперативного державного університету Баден-Вюртемберг (Штутгарт, Німеччина).

Експериментальна установка містить Мікро-DEFC, етанольне паливо 95%, чисту воду, циліндр об'ємом 100 мл, шприци об'ємом 10 мл, папір мірний кислотно-лужний. Загальний вигляд прямого етанолового паливного елемента Мікро-DEFC наведений на рис.3.1, де позначено: 1 – комплект кришок, 2 – набір лопастей, 3 – мембрана (MEA); 4 – паливний елемент; 5 – розчин циліндра.

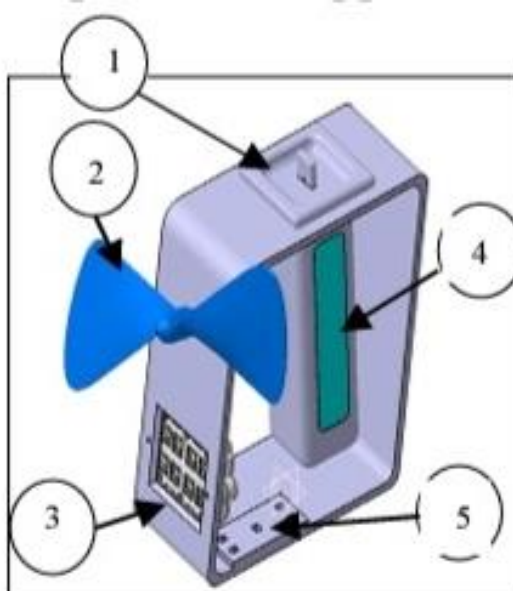
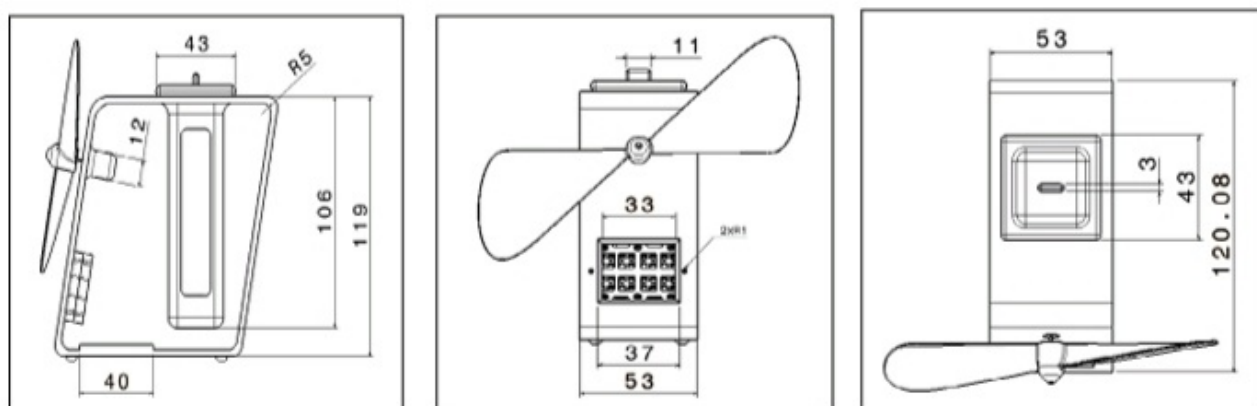


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд прямого етанолового паливного елемента

Креслення експериментальної установки з вказанням геометричних розмірів у міліметрах наведено на рис. 3.2.



а)

б)

в)

Рисунок 3.2 – Креслення експериментальної установки:

(а) вид спереду; (б) вид збоку; (в) вид зверху

Етанольний паливний елемент – це демонстрація заміни еталю палива на електричну енергію. Такий пристрій може працювати багато годин без підзаряджання. Експериментальні дослідження, що наведені в наступних підрозділах, стосується споживання палива етанолу для виробництва електроенергії.

3.2 Дослідження впливу концентрації етанолу на енергетичні характеристики паливного елемента

Результати експерименту показані нижче. Умови роботи камери становлять приблизно від 31 до 32 °C для температури (при кімнатній температурі), тиск 1 атм. Стаціонарний час для збору кожного значення даних становить приблизно від 5 до 10 хвилин. Експериментальні результати щодо впливу концентрації етанолу на продуктивність паливного елемента наведені нижче в табл. 3.1.

З експериментальних результатів видно, що зі збільшенням концентрацій етанолу за об'ємом, зокрема при концентрації етанолу 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 мілілітрів у 60 мілілітрах води, спостерігається наступна картина. Напруга та потужність паливного елемента швидко зростають при концентрації етанолу 3, 5, 7 мілілітрів на 60 мілілітрів води. Після цього показники поступово падають. Якщо концентрація етанолу менше 3 мілілітрів або більше 15 мілілітрів у 60 мілілітрах води, то паливний виробляє невеликі значення напруги (mV) та потужності (nW), які неможливо виміряти. Зі збільшенням концентрації етанолу за об'ємом, концентрація реагентів у місцях реакції збільшується, тому електрохімічна швидкість також зростає, але коли вона досягає точки насичення, продуктивність поступово падає.

З табл. 3.1 середні експериментальні дані показують, що максимальне значення струму, максимальна напруга елемента та максимальна потужність паливного елемента становлять, відповідно, 17,1953 мА, 0,7574 мВ та 13,0473 мВт. Максимальна продуктивність елемента досягається при співвідношенні етанолу 7 мілілітрів на 60 мілілітрів води.

### 3.3 Дослідження впливу робочої температури на ефективність роботи паливного елемента

У роботі також досліджено вплив зміни робочої температури на продуктивність виробництва електроенергії паливним елементом. Прийняті робочі температури – від 30 до 55°C при робочому тиску 1 атм. При температурі 30-35°C, що час сталого стану для збору кожного значення даних становить приблизно від 5 до 10 хвилин, що збільшує температуру до 40–55 °C, що час сталого стану для збору кожного значення даних скорочується до 2–3 хвилин. Експериментальні результати для цих випадків наведені нижче в табл. 3.2. З усереднених експериментальних даних колекції бачимо, що максимальний струм, максимальна напруга елемента та максимальна потужність паливного елемента становлять 18,8 мА, 0,96 мВ та

18,2 мВт, відповідно. Вони відбуваються при співвідношенні етанолу, рівному 13 мілілітрів на 60 мілілітрів води і при робочій температурі комірки від 49 до 50 °С і тиску 1 атм. Якщо концентрація етанолу більше ніж 13 мілілітрів у 60 мілілітрах води, продуктивність паливного елемента знижується. Зі збільшенням концентрації етанолу за об'ємом, концентрація реагентів у місцях реакції зростає, тому електрохімічна швидкість також зростає, але коли вона досягає точки насичення, продуктивність падає (табл. 3.2).

## ВИСНОВКИ

Паливні елементи екологічно безпечні і мають ККД до 80%, тоді як двигуни внутрішнього згорання забруднюють довкілля і ККД їх досягає не більше 30%. Паливні елементи не містять рухомих деталей і абсолютно безшумні [7]. Наприклад, в [2] описана оптимальна техніко-економічна багаторівнева стратегія управління енергією (EMS) мікромережі постійного струму, застосованої до комерційної будівлі. Запропонована енергосистема являє собою підключену до мережі мікромережу, що складається з системи паливних елементів (FC), фотоелектричної (PV) матриці та акумуляторної батареї. Взаємодія між різними типами джерел живлення може призвести до стабільності. Крім того, важливими факторами є забезпечення безперебійного та високоякісного джерела живлення, зниження експлуатаційних витрат і максимізація ефективності системи. Запропонований EMS складається з двох рівнів для мінімізації експлуатаційних витрат і забезпечення навантаження, а також іншого рівня керування, заснованого на теорії рівномірного керування для покращення якості електроенергії. Перший рівень базується на одній із наступних EMS: State Machine Control (SMC), Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) і External Energy Maximization Strategy (EEMS) – для підвищення ефективності та зменшення необхідної потужності. Другий рівень заснований на економічному алгоритмі диспетчеризації (EDA) для зниження експлуатаційних витрат.

Для паливного елемента типу DEFC важливо дослідити вплив концентрації етанолу та температури функціонування паливного елемента на енергетичні характеристики – струм, напругу та електричну потужність у вихідному колі паливного елемента. Найбільш достовірну та повну картину стосовно впливу зазначених факторів на якість функціонування паливного елемента можна отримати із застосуванням фізичної моделі (експериментального зразку) паливного елемента[27]. Експериментальний метод знайшов широке застосування при дослідженні етанольних паливних

елементів та показав свою ефективність, що відображено в чисельних наукових публікаціях [26].

Мета цього дослідження полягає в тому, щоб вивчити продуктивність паливного елемента мікропрямого етанолу, особливо на етаноловому паливі норма витрати для застосування з портативними електронними пристроями. Було встановлено експериментальний апарат на паливному елементі мікропрямого етанолу для прогнозування продуктивності елемента. Продуктивність клітини вказана в умовах ,напруга комірки, струм комірки та потужність комірки для умов експлуатації в приміщенні. Умови роботи клітини такі близько 31-32 С для температури, 1 атм для тиску. Стаціонарний час для збору кожного значення даних становить приблизно від 5 до 10 хвилин. Зі збільшенням концентрацій етанолу за об'ємом концентрація реагентів при реакції збільшується, тому електрохімічна швидкість також зростає, але коли вона досягає точки насичення продуктивність поступово падає. З усереднених експериментальних даних максимальний струм, максимальна напруга елемента та максимальна потужність паливного елемента становлять 17,1953 мА, 0,7574 мВ та 13,0473 мВт. Максимальна продуктивність клітини досягається при співвідношенні етанолу 7 мілілітрів на 60 мілілітрів води. При концентрації етанолу менше 3 мілілітрів або більше 15 мілілітрів у 60 мілілітрів води, що набір паливних елементів не може виробляти напругу та струм елемента (виробляє небагато, що неможливо виміряти). Також вивчається вплив зміни робочої температури на продуктивність виробництва електроенергії.

Робочі температури осередку варіюються від 30 до 55 °С при робочому тиску 1 атм. Від середніх експериментальних даних про максимальне виробництво струму, максимальну напругу елемента та максимальну потужність паливного елемента 18,8 мА, 0,96 мВ і 18,2 мВт відповідно. Вони відбуваються при співвідношенні етанолу, рівному 13 мілілітрів у 60 мілілітрах води та робочій температурі кювети від 49 до 50 °С

і тиску 1 атм. Для отримання більшої потужності, яку ми можемо використовувати, збільшивши кількість елементів у паливних елементах.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Larminie J, Dick A. Fuel Cell Systems Explained, 2nd ed. John Wiley and Sons: West Sussex; 2003.
2. Wongyao N, Therthianwong A, Therthianwong S. Performance of direct alcohol fuel cells fed with mixed methanol/ethanol solutions. *Energy Convers Manage* 2011; 5226: 76-81
3. Xu Q, Zhao TS, Yang WW, Chen R. A flow field enabling operating direct methanol fuel cells with highly concentrated methanol. *Int. J. Hydrogen Energy* 2011; 368: 30-80.
4. Matsuoka K, Iriyama Y, Abe T, Matsuoka M, Oguni Z. Alkaline direct alcohol fuel cells using an anion exchange membrane. *J. Power Sources* 2005; 150: 27-31.
5. Roelofs KS, Hirth T, Schiestel T. Dihydrogenimidazole modified silica-sulfonated poly (ether ether ketone) hybrid materials as electrolyte membranes for direct ethanol fuel cells. *Mater. Sci. Eng., B* 2011; 1767: 27-35.
6. Song SQ, Zhou WJ, et al. Direct ethanol PEM fuel cells: the case of platinum based anodes. *Int. J. Hydrogen Energy* 2005; 368: 995-1001.
7. NDCPower, EOS Direct Ethanol Fuel Cells, 2011.
8. NDcPower, EOS vs conventional fuel cell technology. Horizon Fuel Cell Technologies Pte Ltd [1 February 2012]., <http://www.ndcpower.com/green-power.php> , 5 November 2016.
9. Abdullah S, Kamarudin SK. Development of a conceptual design model of a direct ethanol fuel cell (DEFC). *Int. J. Hydrogen Energy* 2015; 40: 11943 – 11948.
10. Andreadis GM, Podias AKM, Tsiakaras PE. The effect of the parasitic current on the direct ethanol PEM fuel cell operation. *J. Power Sources* 2008; 1812: 14-27.
11. Zhu H, Kee RJ. A general mathematical model for analyzing the performance of fuel-cell membrane-electrode assemblies. *J. Power Sources* 2003; 117: 61-74.

12. Jeng KT, Chen CW. Modeling and simulation of a direct methanol fuel cell anode. *J. Power Sources* 2002; 112: 67-75.
13. Suresh NS, Jayanti S. Cross-over and performance modeling of liquid-feed polymer electrolyte membrane direct ethanol fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy* 2011;1 46: 48-58.
14. Sarris I, Tsiakaras P, Song S, Vlacos N. A three-dimensional CFD model of direct ethanol fuel cells anode flow bed analysis *Solid State Ionics* 2006;177: 33-80
15. Брижко В.М., Фурашев В.М. Інформаційне право та інформаційне законодавство: наукове видання / НДПП НАПрН України. Київ: Видавничий дім “АртЕК”, 2020. 288 с.
16. Данильян О. Г., Дзьобань О.В. *Методологія наукових досліджень : підручник*. Харків: Право, 2019. 368 с.
17. *Академічна доброчесність: проблеми дотримання та пріоритети поширення серед молодих вчених: монографія / за заг. ред. Н. Г. Сорокіної, А. Є. Артюхова, І. О. Дегтярьової*. Дніпро: ДРІДУ НАДУ, 2017. 169 с.
18. Семенюк Е., Мельник В. *Філософія сучасної науки і техніки: підручник*. Вид. 3-ге, випр. та допов. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 364 с.
19. Остапчук М. В., Рибак А. І., Ванюшкін О. С. *Методологія та 15 організація наукових досліджень: підручник*. Одеса: Фенікс, 2014. 375 с.
20. Данильян О. Г., Дзьобань О. П. *Методи правового дослідження*. Велика українська юридична енциклопедія: у 20 т. Харків: Право, 2017. Т. 2: *Філософія права / редкол.: С. І. Максимов (голова) та ін.* С. 456-459.
21. Семенюк Е., Мельник В. *Філософія сучасної науки і техніки: підручник*. Вид. 3- ге, випр. та допов. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 364 с.
22. Кущевський М. О. *Історія науки і техніки: навчальний посібник*. Хмельницький: ХНУ, 2015. 467 с.
23. [ Електронний ресурс] [https://uk.wikipedia.org/wiki/Науковий\\_метод](https://uk.wikipedia.org/wiki/Науковий_метод)

- 24.[Електронний ресурс] [https://fmab.khadi.kharkov.ua/fileadmin/F-FUB/Управління\\_та\\_адміністрування/3\\_OND\\_L2.pdf](https://fmab.khadi.kharkov.ua/fileadmin/F-FUB/Управління_та_адміністрування/3_OND_L2.pdf)
25. Shrivastava, N.K., Chadge, R.B., Ahire, P. *et al.* Experimental investigation of a passive direct ethanol fuel cell. *Ionics* **25**, 719–726 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11581-018-2797-7>;
26. Jinlin Han, L.M.T Somers, Roger Cracknell, Arndt Joedicke, Robert Wardle, Vivek Raja Raj Mohan, Experimental investigation of ethanol/diesel dual-fuel combustion in a heavy-duty diesel engine, *Fuel*, Volume 275, 2020, 117867, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117867>.
27. Zhu H, Kee RJ. A general mathematical model for analyzing the performance of fuel-cell membrane-electrode assemblies. *J. Power Sources* 2003; 117: 61-74
28. Suresh NS, Jayanti S. Cross-over and performance modeling of liquid-feed polymer electrolyte membrane direct ethanol fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy* 2011;1 46: 48-58
29. Sarris I, Tsiakaras P, Song S, Vlacos N. A three-dimensional CFD model of direct ethanol fuel cells anode flow bed analysis *Solid State Ionics* 2006;177: 33-80.

## **ДОДАТКИ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО  
УНІВЕРСИТЕТ МАТЕЯ БЕЛА (СЛОВАЦЬКА РЕСПУБЛІКА)  
ТЕХНІЧНИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ШЛЯХІВ СПОЛУЧЕННЯ  
(КИТАЙСЬКА НАРОДНА РЕСПУБЛІКА)  
НАРОДНА АКАДЕМІЯ ІМ. ЯНА ГУСА (ЧЕСЬКА РЕСПУБЛІКА)  
АКАДЕМІЯ «VOLASHAQ» (РЕСПУБЛІКА КАЗАХСТАН)  
КАРАГАНДІНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
(РЕСПУБЛІКА КАЗАХСТАН)

## **МАТЕРІАЛИ**

**XXIX МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ  
КОНФЕРЕНЦІЇ  
СТУДЕНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА МОЛОДИХ УЧЕНИХ  
«АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ  
СУСПІЛЬСТВА»**

## **PROCEEDINGS**

**XXIX INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL  
CONFERENCE OF YOUNG SCIENTISTS AND SPECIALISTS  
«ACTUAL PROBLEMS OF THE SOCIETY'S VITAL ACTIVITY»**

Посвідчення УкрІНТЕІ про реєстрацію № 911 від 08.11.2021 р.

**Кременчук, 28 – 29 квітня 2022 р.**

10. ВИКОРИСТАННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ  
ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ  
Малий Я.С., студ., Шведчикова І.О., д.т.н., проф.,  
Фуцур А.В., студ., Солошич І.О., д.пед.н., доц., Солошич О.М., доктор філософії з інженерії  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
Київський національний університет технологій та дизайну  
Ланьчжоуський Джіатонг Університет шляхів сполучення, Китайська Народна Республіка

**ВИКОРИСТАННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

*Малий Я.С., студ., Шведчикова І.О., д.т.н., проф.  
Київський національний університет технологій та дизайну  
Фуцур А.В., студ., Солошич І.О., д.пед.н., доц.  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
Солошич О.М., доктор філософії з інженерії  
Львівський національний університет імені Лесі Українки*

76

Метою роботи є вивчення особливостей та перспектив використання гібридних систем електроживлення на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема фотоелектричних систем з акумуляторними накопичувачами, для енергозабезпечення об'єктів залізничного транспорту та інфраструктури. Об'єктом дослідження є процеси застосування відновлюваних джерел енергії на об'єктах залізничного транспорту та інфраструктури. Предметом дослідження виступає гібридна система електроживлення об'єктів залізничної інфраструктури (залізничні станції, переїзди, розвантажувальні пункти, технічні служби).

Одним із ключових трендів розвитку транспортної галузі України стає використання на транспорті та об'єктах транспортної інфраструктури екологічно безпечних систем живлення на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Використання енергії з ВДЕ в транспортному секторі здійснюється переважно за рахунок електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел, та рідких та газоподібних похідних біомаси. Сучасним напрямком також слід вважати використання на транспорті водню, виробленого за допомогою електроенергії з ВДЕ [1]. Україна – один із світових лідерів щодо розвиненості інфраструктури залізничного транспорту. В транспортному секторі України найбільша кількість електроенергії, виробленої з ВДЕ, споживається саме залізничним транспортом та інфраструктурою (близько 80%) [1]. Тому вивчення особливостей використання ВДЕ для енергозабезпечення об'єктів залізничної інфраструктури є актуальним завданням.

Залізничний транспорт та інфраструктура України споживають значну кількість енергоресурсів, передусім електроенергію та дизельне паливо. Так, за даними [2] залізнична інфраструктура споживає 4,632 млрд. кВт·год. електроенергії на рік, з них: 3,815 млрд. кВт·год. – на тягу поїздів, 0,817 млрд. кВт·год. – на інші виробничі потреби. На початок 2020 р. в структурі витрат основних видів енергоресурсів витрати на електроенергію склали 87% (для порівняння – у 2012 р. витрати на електроенергію були на рівні 69,6%) [2, 3].

В Україні електрифіковано менше половини залізничних колій, зокрема загальна довжина залізничних колій – 21,6 тис. км, з них електрифікованих – 10,2 тис.км або 47,2% [2]. По мірі подальшої електрифікації залізничних колій та розвитку інфраструктури (будівництво нових станцій, систем залізничної автоматики та телемеханіки, зарядних станцій тощо) витрати на споживання електроенергії прогнозовано зростатимуть. Необхідно також враховувати той факт, що становлення ринку електричної енергії в Україні супроводжується зростанням тарифів на споживання електроенергії.

Будівництво нових інфраструктурних об'єктів передбачає їхню географічну прив'язку до існуючих розподільних мереж або прокладання нових ліній електропередачі, що пов'язано зі значними капітальними витратами. Слід також зважати на зношеність вітчизняних існуючих розподільних мереж, яка становить до 50%. В цих умовах перспективним виглядає використання екологічно безпечних систем електроживлення на основі ВДЕ, зокрема фотоелектричних систем з акумуляторними накопичувачами.

У галузі залізничного транспорту України вже впроваджують інноваційні енергозберігаючі технології з використанням ВДЕ, що є частиною комплексної програми з енергозбереження Укрзалізниці. Але до сих пір використання ВДЕ у залізничній інфраструктурі України обмежене. Найбільшого поширення набуло використання сонячних колекторів для обігріву будівель та нагрівання води. В системах опалення, гарячого водопостачання та технологічних процесах Укрзалізниці задіяні також 13 теплових насосів. Вони перетворюють енергію з низьким потенціалом (природних водойм, ґрунту, повітря) в теплову енергію, придатну для практичного використання. Таким чином, для об'єктів залізничної інфраструктури перспективним виглядає використання екологічно безпечних гібридних систем електроживлення на основі ВДЕ, зокрема фотоелектричних систем з акумуляторними накопичувачами, що дозволить: знизити витрати на енергію, що споживається з розподільної мережі, особливо в умовах тарифів на електроенергію, що змінюються в часі; уникнути витрат на будівництво нових ліній електропередачі за наявності можливості забезпечення автономного функціонування об'єкта; підвищити надійність електропостачання об'єктів інфраструктури залізничного транспорту за рахунок забезпечення функції безперебійного живлення.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Проект розпорядження Кабінету Міністрів України «Про Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року». – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/uk/content/elektronni-consultatsii>.
2. Річний звіт АТ «Укрзалізниця», 2019. 234 с. Режим доступу: [http://portal.uz.gov.ua/wp-content/uploads/2020/12/Book\\_UZ\\_19\\_UA\\_FIN\\_web.pdf](http://portal.uz.gov.ua/wp-content/uploads/2020/12/Book_UZ_19_UA_FIN_web.pdf).
3. Остапчук В.М., Мелешко М.В., Підпригора А.І. Альтернативна енергетика. Енергія сонця. Перші кроки залізничного транспорту // Локмотив-інформ. 2013. № 01(79). С. 72-74. Режим доступу: [https://odz.gov.ua/lean\\_pro/materials/20140203-094244-2014\\_02\\_03\\_07\\_0.pdf](https://odz.gov.ua/lean_pro/materials/20140203-094244-2014_02_03_07_0.pdf).

77

## EXPERIMENTAL SETUP OF THE MICROBIAL FUEL CELL

**Yannick Seiß** – electronic engineering student, [et20046@lehre.dhbw-stuttgart.de](mailto:et20046@lehre.dhbw-stuttgart.de)

**Wolf Burger** – prof., [w.burger@hb.dhbw-stuttgart.de](mailto:w.burger@hb.dhbw-stuttgart.de)

Baden-Wuerttemberg Cooperative State University, Stuttgart, Germany

**Malyi Ya.** – gr. MgEM 21, master student, [yarikmaly2899@ukr.net](mailto:yarikmaly2899@ukr.net)

**Shvedchykova I.** – prof., [shvedchykova.io@knutd.edu.ua](mailto:shvedchykova.io@knutd.edu.ua)

**Byla T.** – docent, [bila.ty@knutd.edu.ua](mailto:bila.ty@knutd.edu.ua)

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

The objective of the work is to develop a setup of a simple laboratory experiment to evaluate the function of a microbial fuel cell.

Bioelectrochemical systems such as microbial fuel cells use processes occurring in living organisms to obtain electrical energy or hydrogen [1]. The advantage of these systems is primarily the absence of hazardous waste that would pollute the environment, and the possibility of using waste from various enterprises rich in organic substances (for example, wastewater from food processing enterprises) as raw materials. The function of microbes in a fuel cell is to catalyze the reaction that involves the conversion of chemical energy into electrical energy. The metabolic processes of these microorganisms produce electrons by oxidizing a carbon source, which in many applications, is a carbohydrate monomer. The electrons generated at the anode can then be passed through an external circuit to produce power. These electrons enter the cathode to combine with the protons ( $H^+$ ) that transfer through a PEM and bind with externally provided oxygen to form water (Fig. 1).

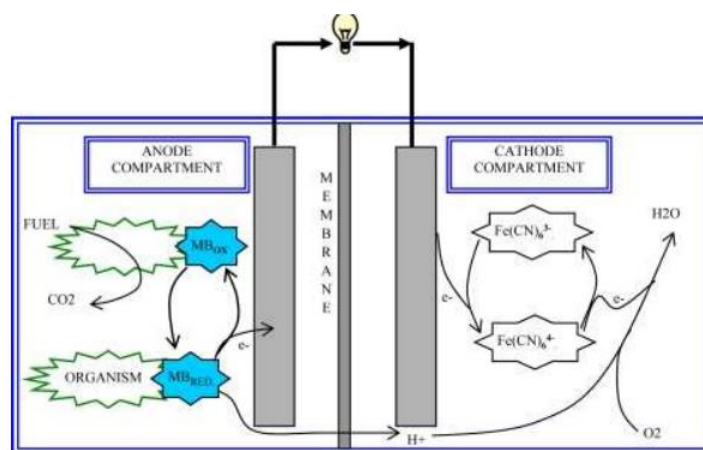
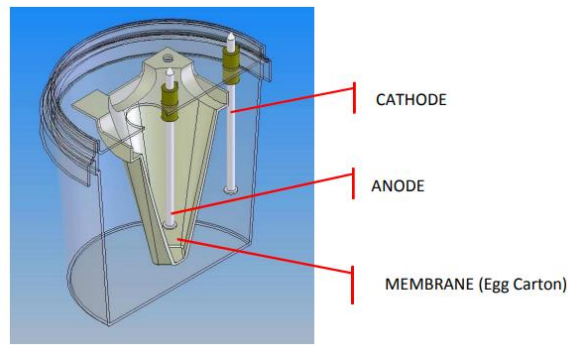


Figure 1 – The functioning of the microbial fuel cell

The scheme of experimental setup of the microbial fuel cell, developed in Duale Hochschule Baden-Württemberg (DBWH) of Baden-Wuerttemberg



Cooperative State University, is shown in Fig.2. The view of the real experimental setup of the microbial fuel cell is presented in Fig. 3.



*Figure 2 – The scheme of the experimental setup of the microbial fuel cell*

The working fluid was prepared: cathode compartment – glucose solution with concentration  $w=10\%$ ; anode compartment – 3g dry yeast was solved in 50ml deionized water until complete dissolution, and 5g of glucose was added. Measurement of the Fuel Cell performance in the open circuit mode is carried out.



*Figure 3 – The view of the real experimental setup*

**Conclusions.** The simple laboratory setup to evaluate the function of a microbial fuel cell is shown. It allows investigation of the open circuit voltage depending on the time.

### **R e f e r e n c e s**

1. Girguis P. R. Fundamentals of benthic microbial fuel cells: theory, development and application / P.R. Girguis, M.E. Nielsen, C.E. Reimers // Bioelectrochemical Systems: From Extracellular Electron Transfer to Biotechnological Application. – IWA Publishing. – 2010. – P. 327-346.



# ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ДОСЛІДЖЕННЯ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

*Воздраганов М.Р.* – гр. БЕМ-20, [vozdroganovmukuta@ukr.net](mailto:vozdroganovmukuta@ukr.net)

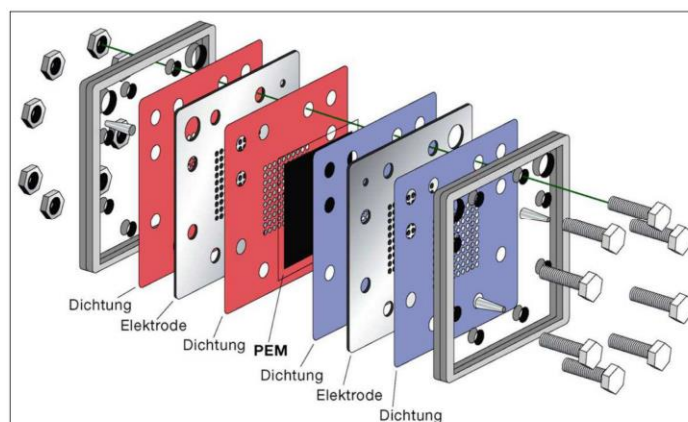
*Малий Я.С.* – гр. МГЕМ 21, магістр, [yarikmaly2899@ukr.net](mailto:yarikmaly2899@ukr.net)

*Шведчикова І.О.* – д.т.н., проф., [ishved89@gmail.com](mailto:ishved89@gmail.com)

*Київський національний університет технологій та дизайну*

**Метою роботи** є вивчення досвіду впровадження лабораторного практикуму з дослідження водневих паливних елементів.

Серед всіх видів паливних елементів найбільше застосування знайшли водневі паливні елементи з полімерною протонобмінною мембраною типу PEMFC (рис. 1). Вони використовуються на транспорті (автомобілі, що працюють на водні), в якості первинних і резервних джерел енергії, в портативній електроніці. В якості електроліту в таких паливних елементах застосовується мембрана з полімеру товщиною приблизно в 2-7 шарів звичайного паперу; відновлювачем виступає чистий водень. PEMFC мають наступні особливості: функціонування при достатньо низьких температурах (до 100°C), швидка зміна потужності, висока щільність енергії та достатньо висока вихідна напруга (близько 0,7 В з однієї комірки) [1].



*Рисунок 1 – Конструкція PEMFC*

В останній час спостерігається стрімкий розвиток та розповсюдження PEMFC технології. Тому важливим етапом підготовки майбутніх інженерів електротехнічних спеціальностей є ознайомлення з характеристиками паливних елементів типу PEMFC під час проведення лабораторних робіт.

В Кооперативному державному університеті Баден-Вюртемберг (Німеччина), який є партнером Київського національного університету технологій та дизайну, розроблений лабораторний практикум для дослідження різних типів паливних елементів. В рамках даної роботи розглянуто лабораторну установку для вивчення водневих паливних елементів PEMFC, в якості якої використовується науковий набір для автомобілів на паливних елемента Horizon FCJJ-11 (рис.2) [2]. За допомогою пристрою (рис.2) студенти знайомляться з принципом роботи реального транспортного засобу на паливних елементах – перетворенням водню на електричну енергію для приводу в дію автомобіля; вимірюють електричні параметри (струм та напругу), оцінюють ефективність роботи паливного елемента в залежності від напруги комірки, а також в порівнянні з іншими типами паливних елементів.

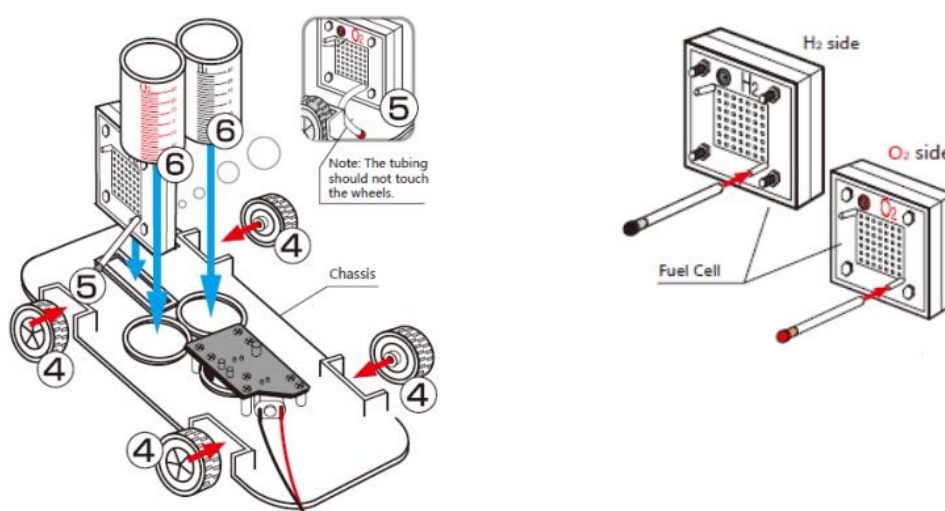


Рисунок 2 – Horizon FCJJ-11 PEMFC

Досвід впровадження лабораторної роботи показав, що під час виконання завдань студенти набувають компетентності здійснювати технічну розробку пристрою з бажаними властивостями; працюють разом міждисциплінарно в рамках виконання роботи; самостійно отримують

додаткові знання та критично відображають результати дослідження. Під час проведення лабораторних занять студенти можуть використовувати свої навички з інших областей навчання, наприклад, з матеріалознавства та інформатики.

**Висновки.** Встановлено, що лабораторний практикум є важливою формою набуття фахових компетентностей здобувачами вищої освіти електротехнічних спеціальностей. Розглянуто експериментальну установку на основі Horizon FCJJ-11 для вивчення водневих паливних елементів PEMFC; визначено основні задачі, що вирішуються під час проведення лабораторної роботи. Узагальнено досвід впровадження лабораторної роботи в партнерському університеті в Німеччині.

### Л і т е р а т у р а

1. Головка Н.В. Фізичні основи паливних елементів та перспективи їх використання // Наукові та методичні засади фізичної освіти. – 2014. – № 1(6). – С. 104-110.
2. Fuel Cell Car Science Kit. [Online]. – Режим доступу: [https://www.fuelcellearth.com/wp-content/uploads/converted\\_files/pdf/FCJJ-11-datasheet.pdf](https://www.fuelcellearth.com/wp-content/uploads/converted_files/pdf/FCJJ-11-datasheet.pdf).