

УДК 006.91:53.088.6

В.М. Мокійчук<sup>1</sup>, Н.О. Лисуненко<sup>2</sup><sup>1</sup> Національний авіаційний університет, Київ<sup>2</sup> Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України, Київ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛЬТАМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМІЧНОЇ ПАЛИВНОЇ КОМІРКИ

В статті розглянуті результати експериментальних досліджень керамічних паливних комірок, виміряні їх вольт-амперні характеристики (ВАХ). Наведено структурну схему стенду для вимірювання характеристик комірок. За отриманими даними встановлено і побудовано модель вольтамперної характеристики та характеристику потужності із застосуванням регресійного аналізу. Визначено оптимальний рівень навантаження керамічної паливної комірки і обчислено похибку вимірювання ВАХ.

**Ключові слова:** керамічна паливна комірка, вольт-амперна характеристика, характеристика потужності, похибка вимірювання.

### Вступ

Проблема екологічної безпеки та захисту навколишнього середовища є дуже суттєвою. Сучасне виробництво електроенергії супроводжується серйозними екологічними проблемами. Для економного використання енергетичних і паливних речовин та розвитку енергетики в цілому необхідне розроблення пристроїв для прямого перетворення хімічної енергії палива в електричну.

Паливні комірки – це новий прорив у світі науки, який розвивається з кожним днем і потребує все більшого дослідження. Завдяки таким пристроям як керамічні паливні комірки (КПК) можна заощадити чимало традиційних видів природного палива. Високий коефіцієнт корисної дії й екологічна чистота роблять КПК привабливими для застосування в автомобільній індустрії [1]. КПК перетворюють хімічну енергію палива в електричну і теплову з найменшим рівнем шкідливих викидів, поки на них надходять реагенти [2]. Використання таких КПК є перспективною альтернативою пристроям сучасної енергетики.

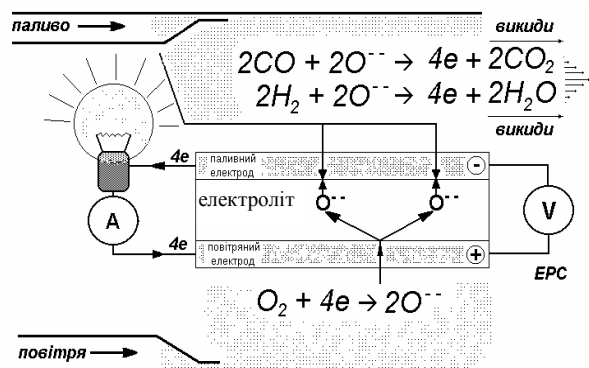


Рис. 1. Схематичне зображення роботи КПК

Сучасна КПК має багатшарову структуру:

- електроліт, основною задачею якого є рух іонів кисню з катоду до аноду;

- анод, що відповідає за окиснення палива;
- катод, який забезпечує відновлення кисню.

На рис. 1 показано схематичне зображення будови та принцип дії паливної комірки.

Між анодом і катодом знаходяться електроліт, який здатний проводити крізь себе носій електричного заряду. На анод безперервно надходить паливо – водень. До катоду підводиться кисень повітря, з якого утворюються аніони під дією каталізатора.

Водень подається високо пористим анодом і надходить в електроліт через мікропори у матеріалі електрода. При цьому відбувається розкладання молекул газу на атоми, які в результаті хемосорбції, віддаючи кожен по одному електрону, перетворюються на позитивно заряджені іони. Далі іони дифундують через електроліт до позитивного боку елемента. Окисник, що надходить на катод, переходить в електроліт і також реагує на поверхні електрода за участю каталізатора. При взаємодії його з іонами газу та електронами, які надходять із зовнішнього ланцюга, в результаті утворюється водяна пара. Сумарною реакцією, яка проходить в комірниці є реакція окиснення палива.

Рух електронів у зовнішньому електричному колі є корисною роботою, рушійною силою процесу є велика різниця парціальних тисків горючого газу та окисника. Цей електрохімічний процес може бути здійснений із застосуванням різних матеріалів та у різних формах і відбувається за різних температур.

На сьогодні в Україні не створено системи атестації та сертифікації КПК, які б дозволили оптимізувати вибір та режими експлуатації КПК. Тому у статті запропоновано розглянути можливість застосування таких характеристик КПК як ВАХ та функція потужності у якості сертифікаційних характеристик. Для вимірювання властивостей паливних комірок потрібно визначити послідовність дій, яку необхідно

виконувати при їх дослідженні, а також усталені норми, яким повинні відповідати характеристики експлуатації КПК, а саме температура експлуатації, використовуване паливо та навантаження.

### Експериментальне дослідження характеристик КПК

Характеристики КПК можна розділити на дві групи: технологічні і експлуатаційні. До технологічних характеристик відносяться: будова комірки, матеріали компонентів, параметри мікроструктури, параметри електродів. До експлуатаційних належать: енергетичні, характеристики ефективності роботи і втрат, термін та температура експлуатації, якість контактів.

Дослідження КПК доцільно розпочати з вимірювання енергетичних характеристик КПК. Першорядним показником роботи будь-якої паливної комірки є вихідна напруга в залежності від електричного струму, тобто її ВАХ, яку можна виміряти на спеціальному стенді. Експериментальні дослідження ВАХ проводились за робочої температури 800 °С при постійному потоці палива через комірку на установці «TELEDYNE MEDUZA RD», структурна схема якої наведена на рис. 2.

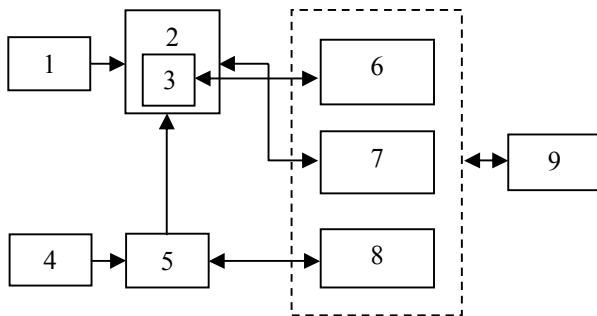


Рис. 2. Структурна схема стенду для вимірювання характеристик КПК: 1 – модуль живлення пічки; 2 – пічка; 3 – КПК; 4 – балони з газом; 5 – регулятор подачі тиску; 6 – модуль вимірювання ВАХ; 7,8 – модуль керування температурою і тиском відповідно; 9 – персональний комп'ютер

За допомогою ВАХ можна розрахувати характеристики ефективності і втрат, що мають місце в процесі роботи комірки, а також побудувати характеристику потужності КПК, яка показує скільки кВт енергії можна отримати з 1 см<sup>2</sup> КПК.

Дослідження складалось з 4-х етапів. Спочатку КПК встановлюється в барабан пічки, закріплюється та піддається нагріванню до температури за якої потенціал КПК буде складати не менше аніж 0,8 В. Далі на КПК подається паливна суміш і приєднується навантаження. Після чого проводилось вимірювання ВАХ шляхом послідовного збільшення та зменшення навантаження. Отримані результати наведені в табл. 1 та на рис. 3.

### Результати досліджень

В табл. 1 наведені результати експериментального дослідження КПК при температурі 800 °С з використанням суміші 5% H<sub>2</sub> – 95 % Ag в якості палива. При використанні чистого водню, ефективність роботи КПК буде значно вищою.

Таблиця 1

Значення струму навантаження та напруги

Струм I, A	Напруга, В					
	U1	U2	U3	U4	U5	U6
0.01	0.845	0.847	0.849	0.849	0.846	0.844
0.02	0.784	0.809	0.802	0.800	0.816	0.820
0.03	0.723	0.745	0.746	0.748	0.761	0.760
0.04	0.674	0.692	0.691	0.687	0.695	0.703
0.05	0.616	0.618	0.637	0.635	0.632	0.631
0.06	0.571	0.563	0.583	0.591	0.579	0.590
0.07	0.539	0.531	0.544	0.546	0.555	0.548
0.08	0.459	0.474	0.478	0.487	0.484	0.495
0.09	0.432	0.434	0.440	0.419	0.441	0.436

На рис. 3 зображено ВАХ при навантаженні КПК. Як видно з рис. 3 КПК має певний гістерезис. Із зовнішнього вигляду ВАХ можна зробити припущення про її лінійний характер, а отже для її апроксимації можна застосувати регресійний аналіз методом найменших квадратів [3, 4].

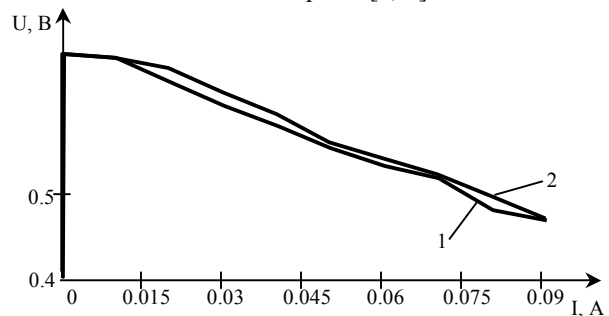


Рис. 3. ВАХ КПК: 1 – послідовне збільшення, 2 – послідовне зменшення навантаження

Отже, за результатами розрахунків було отримано апроксимаційне рівняння ВАХ

$$y(x) = -5,244x + 0,902,$$

яке достатньо добре узгоджується з експериментальними даними, як видно з рис. 4.

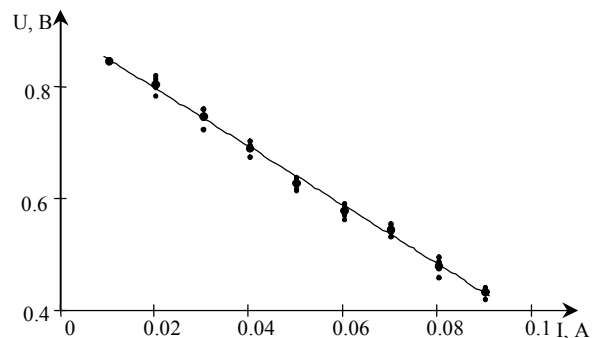


Рис. 4. Графік відображення експериментальних результатів та лінія регресії апроксимованої ВАХ

При оцінюванні узгодженості регресійної моделі використовується коефіцієнт детермінації, значення якого має бути близьким до 1. Обчислене значення коефіцієнта детермінації склало 0,998. Отже, модель добре узгоджується з даними [5].

Для оцінювання похибки апроксимації було розраховано відповідні границі методичної похибки згідно рекомендації [6], що представлені на рис. 5. Максимальне значення відносної похибки склало 4,1 %.

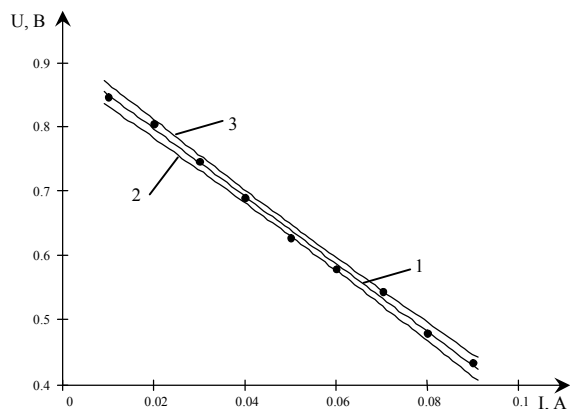


Рис. 5. Графік апроксимованої ВАХ (1) та границі похибки вимірювання (2,3)

За усередненими значеннями напруги (табл. 1) та апроксимаційною функцією було побудовано характеристики потужності КПК відповідно 1 та 2 на рис. 6. З рис. 5 видно, що з огляду на генеровану потужність оптимальним є режим роботи КПК для струмів у діапазоні 0,08-0,09 А.

## Висновки

За розглянутими в статті результатами експериментальних досліджень ВАХ КПК, можна зробити висновок про лінійний характер ВАХ, про доцільність застосування методу найменших квадратів для встановлення параметрів моделі ВАХ, відносна похибка якої склала не більше 5%. Експериментальні результати також показали, що при навантаженні КПК ВАХ вона має певний гістерезис.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИЧЕСКОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

В.М. Мокийчук, Н.А. Лисуненко

*В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований керамических топливных элементов, измерены их вольтамперные характеристики (ВАХ). Приведена структурная схема стенда для измерения характеристик ячеек. По полученным данным установлена и построена модель ВАХ и характеристика мощности с применением регрессионного анализа. Определен оптимальный уровень нагрузки керамического топливного элемента и вычислена погрешность измерения ВАХ.*

**Ключевые слова:** керамический топливный элемент, вольтамперная характеристика, характеристика мощности, погрешность измерения.

## RESEARCH OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF SOLID OXIDE FUEL CELLS

V.M. Mokyichuk, N.O. Lisunenko

*In this article it is considered the results of experimental studies of solid oxide fuel cells and measured their current-voltage characteristics (CVC). It is shown the block diagram of stand for the measurement of cells characteristics. According to the received data it is established and built the model of current-voltage characteristics and power characteristic using regression analysis. It is also determined an optimal level of loading of solid oxide fuel cells and it is calculated the measurement error of current-voltage characteristics.*

**Keywords:** solid oxide fuel cells, current-voltage characteristics, power characteristic, measurement error.

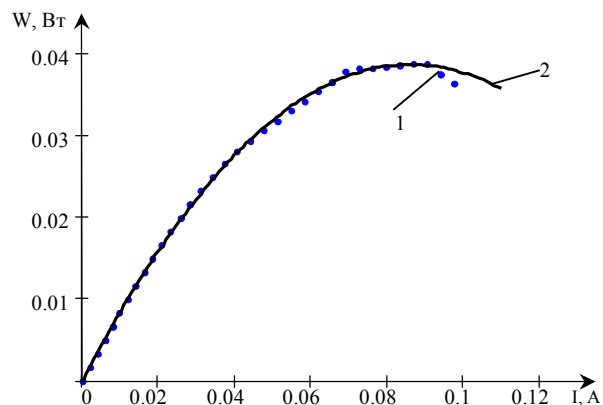


Рис. 6. Характеристика потужності КПК: 1 – побудована за експериментальними даними; 2 – апроксимована

Оптимальним, для розглянутої КПК при температурі експлуатації 800 °С, є режим роботи КПК для струму 0,08-0,09 А.

## Список літератури

1. Fuel Cell Handbook 7th Edition, Morgantown: National Energy Technology Laboratory, 2004. – 427 с.
2. В.В.Коровин. Электрохимическая энергетика / В.В. Коровин. – Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.
3. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посіб. / В.С. Єременко, Ю.В. Куц, В.М. Мокийчук, О.В. Самойліченко – К.: НАУ, 2013. – 320 с.
4. Рекомендации по метрологии. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами при решении измерительных задач. Основные положения: Р 50.2.004-2000. – [введ.2000-08-01]. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. – 11с.
5. Хрущёва И.В. Основы математической статистики и теории случайных процессов : учеб. пособие / И.В. Хрущёва, В.И. Щербаков, Д.С. Леванова. - СПб.: Лань, 2009. – 331 с.
6. Рекомендация. Градуировочные характеристики средств измерений. Методы построения. оценивание погрешностей: МИ 2175-91. – Спб, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1994. –55с.

Надійшла до редколегії 5.05.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Л.М. Щербак, Національний авіаційний університет, Київ.