

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.4.12>

УДК 66.098:
546.11

¹ШВЕДЧИКОВА І. О., ¹ПАНАСЮК І. В.,
²СОЛОШИЧ І. О., ¹МАЛИЙ Я. С.

¹Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

²Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЯК ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Розроблення методичних рекомендацій для проведення лабораторних (практичних) занять з дослідження електричних характеристик паливних елементів для використання в навчальному процесі підготовки здобувачів за різними рівнями вищої освіти та освітніми програмами.

Методика. Передбачає обробку експериментальних даних, отриманих під час проведення досліджень, та виявлення закономірностей щодо впливу таких факторів, як концентрація та температура розчину етанолу, на енергетичні характеристики паливного елемента типу Мікро-DEFC.

Результати. Розроблено методичні рекомендації до виконання практичних (лабораторних) робіт, присвячених дослідженню фізичних властивостей етанолового паливного елемента. Наведено тестові результати, отримані під час проведення експерименту з визначення впливу концентрації етанолу на енергетичні характеристики паливного елемента. Показано, що методичні рекомендації мають універсальний характер та адаптовані до можливостей та потреб здобувачів, які навчаються за різними освітніми програмами та рівнями підготовки: перший (бакалаврський) та другий (магістерський).

Наукова новизна. З використанням експериментального зразка Horizon FCJJ-22 Fuel Cell типу Мікро-DEFC розроблені методичні рекомендації дослідницької спрямованості для здобувачів, що навчаються за різними освітніми програмами, структура яких охоплює розгляд теоретичних питань, зокрема ознайомлення з хімічними реакціями на електродах паливного елемента, а також проведення експериментальних досліджень з визначення впливу низки факторів на електричні характеристики паливного елемента.

Практична значимість. Розроблені методичні рекомендації з дослідження фізичних властивостей етанолових паливних елементів призначені для використання під час проведення лабораторних та/або практичних занять зі здобувачами вищої освіти, які навчаються за різними спеціальностями та освітніми програмами. Отримані під час таких занять знання та навички стануть основою для розширення у здобувачів власних знань про нові технології в області альтернативної енергетики.

Ключові слова: альтернативна енергетика; відновлювані джерела енергії; екологічний транспорт; інновація; паливний елемент; гібридна система електроживлення; фізичний експеримент.

Вступ. На сьогодні практично усі процеси, від яких залежить існування людства, потребують енергетичних затрат. Стрімкий розвиток техніки, постійно зростаюча вартість енергоресурсів потребують пошуку альтернативної заміни традиційних джерел енергії. В Україні, енергетика якої потерпає від руйнувань через обстріли енергетичної інфраструктури, що призводить до знеструмлення споживачів, розвиток відновлюваних жерел енергії (ВДЕ) та розподіленої генерації виступає запорукою зміцнення енергетичної безпеки країни.

Одним із інноваційних напрямів у галузі альтернативної енергетики є використання паливних елементів (ПЕ) – хімічних джерел струму, які здійснюють «...пряме перетворення енергії палива в електричну енергію, минаючи малоефективні, що йдуть з великими втратами, процеси горіння» [1]. ПЕ працюють на основі метанолу (етанолу) або водню, екологічно безпечні, мають високу енергетичну потужність, низьку емісію шкідливих речовин та

можливість отримання зі вторинної сировини. Інноваційні розробки ПЕ надають широкий простір для використання нових матеріалів, каталізаторів та оптимізації процесів, що забезпечують їх ефективну роботу. Тому дослідження фізичних властивостей ПЕ, за яких досягається максимальна ефективність їх роботи як джерел енергії, є актуальною науково-технічною задачею. Актуальність теми дослідження обумовлена також зростаючим інтересом до електромобільних транспортних засобів на ПЕ, які сприяють розвитку екологічно чистої транспортної системи.

Аналіз попередніх досліджень. До основних типів ПЕ відносять [1]: на твердому оксидному електроліті (Solid Oxid Fuel Cell (SOFC)); на основі розплавленого карбонату (Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)); з прямим окисненням метанолу (Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)) або етанолу (Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC)); на основі фосфорної кислоти (Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)); лужний ПЕ (Alkaline Fuel Cell (AFC)); з протонно-обмінною мембраною (Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)).

На сьогодні відомі декілька напрямків використання ПЕ в системах електроживлення. В більшості випадків вони використовуються як додаткове джерело живлення у складі гібридних (комбінованих) енергетичних систем локальних об'єктів невеликої потужності. Так, в [2] представлений опис водневої паливної комірки як елемента комбінованого джерела електричної енергії для живлення житлового приміщення. Відзначається, що однією з найважливіших переваг водневих паливних комірок є те, що вони використовують водень, який, в свою чергу, може бути отриманий в результаті електролізу за рахунок надлишкової електроенергії у певний період часу, а у піки споживання електроенергії може генеруватися паливною коміркою.

В роботі [2] досліджується гібридна енергетична система, яка складається з фотоелектричної батареї (PV), вітрової турбіни (WT), паливного елемента (FC), водяного електролізера, бака водню як системи зберігання енергії та інвертора. Для конфігурації PV/WT/FC, що працює автономно або підключена до мережі, було встановлено, що ПЕ забезпечує високу якість перетворення енергії та є зручним в обслуговуванні. Основними компонентами ПЕ є два активних електроди: анод, катод окиснювача та електроліт між ними, який пропускає лише іони. Відзначається, що загальний принцип роботи різних ПЕ схожий, а основні відмінності полягають у типі електроліту та робочій температурі.

В роботі [3] продемонстровано модель сонячної фотоелектричної станції, яка враховує динаміку системи електролізу водневого ПЕ та можливість додавання екологічних обмежень для забезпечення використання ВДЕ. Оптимальна модель диспетчеризації, представлена в цій статті, служить для планування роботи фотоелектричних установок у режимі власного споживання. Якщо генерація ВДЕ, менша за попит на навантаження, то енергія, що зберігається в баках для водню, подається на ПЕ для перетворення її в електричну енергію, яка обслуговує навантаження. Коли надлишкова енергія від ВДЕ перевищує енергію, необхідну для повного заряджання водневих резервуарів – надлишок енергії подається в мережу.

Таким чином, ПЕ знаходять все більше застосування в якості додаткового (резервного) джерела енергії в гібридних системах з ВДЕ для електроживлення локальних об'єктів, які функціонують автономно або підключені до мережі.

За останнє десятиліття було проведено ряд досліджень різних технологій ПЕ в системі електромобіля [5–9], що обумовлене швидким інноваційним розвитком екологічно безпечного транспорту. Вважається, що транспортні засоби на водневих ПЕ заправляються так само швидко, як і автомобілі на викопному пальному, і мають аналогічну дальність проїзду [10]. В [8] показано, що ПЕ підходять для застосування на навантажувачах, авіатранспортних та морських транспортних засобах. Перевагами таких транспортних засобів є швидкий час заряджання, безшумна робота, великий запас ходу, низькі викиди вуглецю.

В [11] представлений огляд електромобілей на ПЕ (FCEV), їх принцип роботи, різні топології FCEV, схеми управління енергією та технічні проблеми, з якими вони стикаються. Розглянуто типи двигунів, що використовуються в FCEV. В [7] відмічається, що використання ПЕ в електричних транспортних засобах швидко зростає і стане альтернативою традиційним транспортним засобам у майбутньому. Основні зусилля вчених спрямовані на те, щоб електромобілі на ПЕ мали достатню продуктивність для щоденних транспортних потреб.

Розширення областей застосування ВДЕ, стрімкі зміни в технологіях виготовлення ПЕ впливають на освітню діяльність закладів вищої освіти. В роботі [12] вже проведений аналіз впливу технологічних змін, які відбуваються в умовах зеленого енергетичного переходу, на освітні програми (ОП) підготовки фахівців з електричної інженерії. У той самий час ці зміни впливають на більш широке коло галузей знань. В цих умовах актуалізуються питання оновлення змісту навчальних дисциплін та розроблення сучасного методичного забезпечення, адаптованого до можливостей та потреб здобувачів різних галузей знань.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення методичних рекомендацій до проведення лабораторних (практичних) занять з дослідження фізичних властивостей паливних елементів для використання в навчальному процесі підготовки здобувачів за різними рівнями вищої освіти та освітніми програмами.

Результати дослідження. Як зазначено вище, сучасні технологічні зміни в енергетиці, зокрема інноваційні розробки в області ПЕ, впливають на зміст навчальних дисциплін майбутніх фахівців різних спеціальностей. Так, в Київському національному університеті технологій та дизайну (КНУТД) і Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського (КрНУ) започатковані ОП, тематика навчальних дисциплін яких передбачає ознайомлення з властивостями ПЕ (табл. 1).

Таблиця 1

**Освітні програми та навчальні дисципліни,
тематика яких передбачає ознайомлення з ПЕ**

Рівень/ступінь вищої освіти	Спеціальність/Назва ОП	Навчальні дисципліни
Перший (бакалаврський)/ Бакалавр	141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ ОП «Електромеханіка» (КНУТД)	Інноваційні технології електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
	275 «Транспортні технології (за видами)»/ ОП «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» (КрНУ)	Транспортна екологія
Другий (магістерський)/ Магістр	183 «Технології захисту навколишнього середовища»/ ОП «Екологічна безпека» (КрНУ)	Інноваційна діяльність у сфері екології

Зміст дисципліни «Інноваційні технології електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» включає тему «Паливні елементи», яка охоплює такі питання, як призначення ПЕ; принцип дії та різновиди ПЕ; приклади використання ПЕ в електроенергетиці та електроніці.

До навчальної дисципліни «Транспортна екологія» додана тема, присвячена електромобільності, в межах якої поряд із класичною схемою електромобіля розглядаються принципи побудови електромобілей із застосування ПЕ.

Навчальна дисципліни «Інноваційна діяльність у сфері екології» за своїм змістом спрямована на вивчення процесів екологізації підприємств, у тому числі за рахунок переходу

на отримання енергії з альтернативних джерел, серед яких ПЕ розглядаються як одне з найбільш перспективних ВДЕ.

З урахуванням зазначеного вище авторами статті розроблені методичні рекомендації для проведення лабораторних (практичних) занять з дослідження електричних характеристик ПЕ, особливістю яких є їх адаптивність, тобто можливість використання в навчальному процесі підготовки здобувачів за різними рівнями вищої освіти та ОП (табл. 1).

Розглянемо більш детально порядок та особливості виконання експериментальної роботи на тему «Паливний елемент прямого етанолу типу DEFC». Огляд інформаційних джерел показав, що ПЕ, який використовує водень як паливо, має високу продуктивність, але потребує високого ступеня чистоти та дорогих електродів з платини. З огляду на це, для дослідження обраний ПЕ з прямим етанолом з протоніообмінною мембраною типу DEFC (Direct Ethanol Fuel Cell).

Перевагою DEFC у порівнянні з водневими елементами з протоніообмінною мембраною є можливість використання етанолу в рідкому вигляді, який більш вигідний для збереження та транспортування, ніж водень. На відміну від інших технологій, в яких використовується рідина замість газу, в DEFC немає необхідності в застосуванні зовнішнього конвертора для отримання чистого водню [13]. Перевагою етанолу перед метанолом є його низька токсичність та можливість виробництва з біомаси. Так, етаноловий паливний елемент DEFC може вироблятися з харчових культур (цукрової тростини, кукурудзи, буряка), неїстівних частин харчових рослин або з біомаси тополі, лісових відходів [14].

Метою дослідження під час лабораторного (практичного) заняття є ознайомлення з теоретичними відомостями стосовно ПЕ типу DEFC та експериментальне вивчення впливу концентрації та температури розчину етанолу на робочі характеристики ПЕ, зокрема напругу, що генерується ПЕ, та електричну потужність.

При проведенні експериментальних досліджень щодо впливу концентрації та температури розчину етанолу на фізичні властивості ПЕ використовується експериментальний зразок Horizon FCJJ-22 Fuel Cell типу Мікро-DEFC (рис. 1, а), а також додаткове обладнання (рис. 2): мультиметр, лабораторний термометр, ваги, дріт з кліпсами, скляний посуд об'ємом 100 мл для змішування рідких речовин (етаноловий або метиловий спирт, дистильована вода), а також кубики льоду для охолодження рідини. Розчин етанолу завантажується до контейнеру експериментального зразка (рис. 1, б).

На початковому етапі виконання дослідження здобувачі мають ознайомитися з теоретичними відомостями, зокрема з принципом дії ПЕ та хімічними реакціями на його електродах [15]:

Загальна реакція: $C_2H_5OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$.

Реакція на аноді: $C_2H_5OH + 3H_2O \rightarrow 2CO_2 + 12H^+ + 12e^-$.

Реакція на катоді: $3O_2 + 12H^+ + 12e^- \rightarrow 3H_2O$.

За певних умов реакція припиняється з утворенням оцтової кислоти наступним чином: $C_2H_5OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 4H^+ + 4e^-$. На рис. 2 наведена принципова схема спиртового кисневого ПЕ [15, 16].

Дослідження впливу концентрації етанолу на енергетичні характеристики – струм, напругу та електричну потужність у вихідному колі ПЕ, проводиться за наступних значень концентрації етанолу: 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15%. Осереднені результати тестового експерименту наведені в табл. 2, з яких видно, що зі збільшенням концентрацій етанолу за об'ємом напруга та потужність ПЕ швидко зростають, але потім показники поступово падають. Якщо концентрація етанолу менше 3 мл або більше 15 мл у 60 мл води, то ПЕ виробляє невеликі значення напруги та потужності, 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. Встановлено, що максимальна продуктивність ПЕ досягається при співвідношенні 7 мл етанолу на 60 мл води.

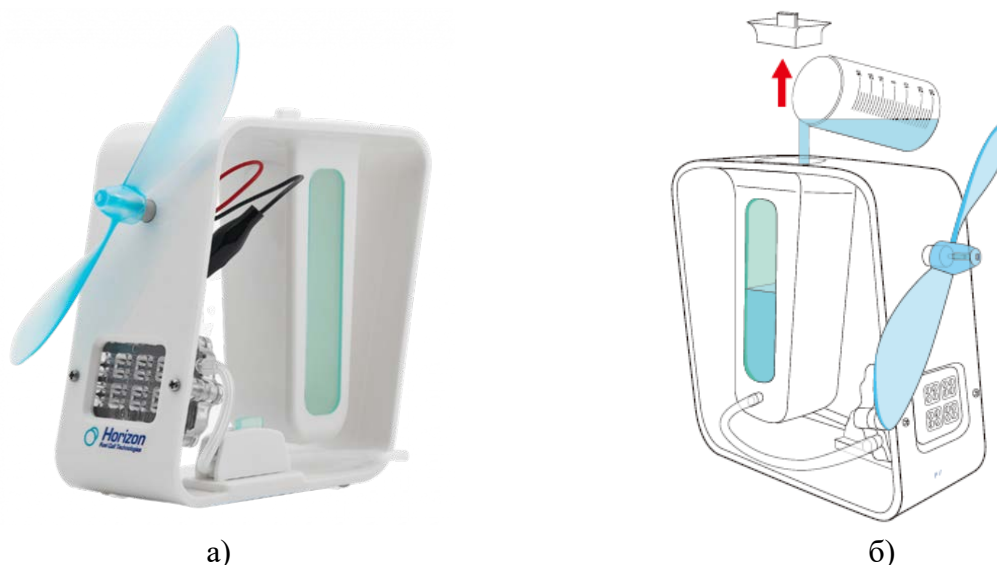


Рис. 1. Експериментальний зразок Horizon FCJJ-22 Fuel Cell:
 а) загальний вигляд; б) заповнення контейнеру зразка розчином етанолу

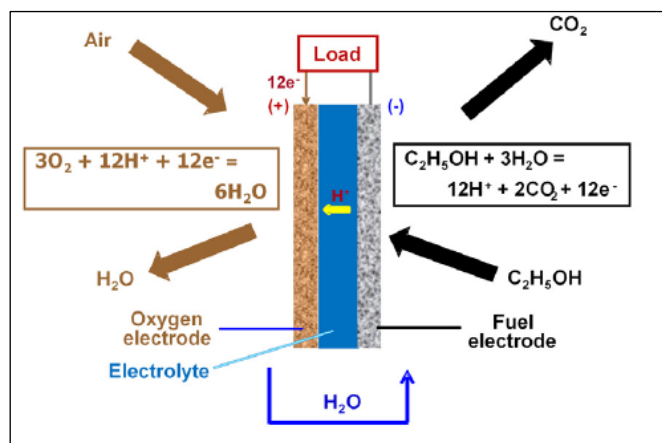


Рис. 2. Принципова схема спиртово-кисневого ПЕ

Таблиця 2

Середні дані результатів експериментального дослідження впливу концентрації етанолу на продуктивність ПЕ

Концентрація етанолу, %	Сила струму, I , А	Напруга, U , В	Потужність, P , Вт
3	10,872	0,669	7,2874
5	11,715	0,662	7,7563
7	17,195	0,757	13,0473
9	15,701	0,747	11,7573
11	15,702	0,723	11,3702
13	15,482	0,733	11,3638
15	16,299	0,705	11,5263

Вивчення впливу зміни робочої температури на продуктивність виробництва електроенергії ПЕ здійснюється при концентрації етанолу 5–7% для робочих температур 10,

15 та 20°C. Для охолодження рідини використовуються кубики льоду. Під час експерименту здобувачі мають підтвердити тенденцію до зростання числових значень енергетичних характеристик із збільшенням температури.

Таким чином, під час досліджень фізичних властивостей ПЕ у відповідності до розроблених методичних рекомендацій здобувачі різних спеціальностей вчаться застосовувати знання у практичних ситуаціях та розширюють власні знання про нові технології в області альтернативної енергетики.

Висновки. В роботі показано, що ПЕ знаходять все більше застосування в якості додаткового (резервного) джерела енергії в гібридних системах з ВДЕ для електроживлення локальних об'єктів та в системах електромобілів. Стрімкі зміни в технологіях виготовлення ПЕ впливають на освітню діяльність закладів вищої освіти, що знаходить відображення в змісті ОП різних спеціальностей. З огляду на це, в роботі запропоновані методичні рекомендації з дослідження фізичних властивостей ПЕ, які, завдяки їх універсальності, можуть використовуватися в навчальному процесі підготовки здобувачів за різними рівнями вищої освіти та ОП.

В розроблених методичних рекомендаціях передбачається визначення концентрації етанолу, за якою досягається максимальна ефективність роботи ПЕ типу Мікро-DEFC, а також дослідження впливу температури на енергетичні характеристики ПЕ. Під час досліджень використовується кспериментальний зразок ПЕ типу Horizon FCJJ-22 Fuel Cell та інше додаткове обладнання.

Перспективи подальших досліджень полягають у проведенні апробації розроблених методичних рекомендацій та у визначенні ступеню результативності виконання завдань здобувачами різних спеціальностей.

References

Література

1. Kuzminskyi, E. V., Shchurska, K. O., Samarukha, I. A. (2017). Palyvni elementi [Fuel cells]. *Sychnasniy stan rozroblenya. Vidnovlualna energetika = Current state of development. Renewable energy*, № 1, P. 90–96. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2013_1_18 [in Ukrainian].
1. Кузмінський Є. В., Щурська К. О., Самаруха І. А. Паливні елементи. *Сучасний стан розроблення. Відновлювана енергетика*. 2017. № 1. С. 90–96. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2013_1_18.
2. Palchyk, O. A. (2011). Modeluvannya avtonomnogo djerela jivlenya na bazi palyvni elementiv [Modeling of an autonomous power source based on fuel cells]. *Energetika i avtomatika = Energy and automation*, № 2 (8), P. 22–30 [in Ukrainian].
2. Пальчик О. А. Моделювання автономного джерела живлення на базі паливних елементів. *Енергетика і автоматика*. 2011. № 2 (8). С. 22–30.
3. Sultan, H. M., Menesy, A. S., Kamel, S., Korashy, A., Almohaimeed, S. A., Abdel-Akher, M. (2021). An improved artificial ecosystem optimization algorithm for optimal configuration of a hybrid PV/WT/FC energy system. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, P. 1001–1025.
3. Sultan H. M., Menesy A. S., Kamel S., Korashy A., Almohaimeed S. A., Abdel-Akher M. An improved artificial ecosystem optimization algorithm for optimal configuration of a hybrid PV/WT/FC energy system. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. P. 1001–1025.
4. Matute, G., Yusta, J. M., Beyza, J., Monteiro, C. (2022). Optimal dispatch model for PV-electrolysis plants in self-consumption regime to produce green hydrogen: A Spanish case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, P. 25202–25213.
4. Matute G., Yusta J. M., Beyza J., Monteiro C. Optimal dispatch model for PV-electrolysis plants in self-consumption regime to produce green hydrogen: A Spanish case study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. P. 25202–25213.
5. Trimm, D. L., Onsan, Z. I. (2001). Onboard fuel conversion for hydrogen-fuel-cell-driven vehicles. *Catalysis Reviews*, Vol. 43 (1–2), P. 31–84.
5. Trimm D. L., Onsan Z. I. Onboard fuel conversion for hydrogen-fuel-cell-driven vehicles. *Catalysis Reviews*. 2001. Vol. 43 (1–2). P. 31–84.

6. Chaitanya, S. R., Siva Kumar, J. S. V., Rambabau, M. (2014). Fuel cell supplied SVPWM controlled inverter fed PMSM drive in an electrical vehicle. *International Journal of Engineering Research and Technology* (IJERT), Vol. 3, No. 9, P. 806–812. URL: <https://www.ijert.org/research/fuel-cell-supplied-svpwm-controlled-inverter-fed-pmsm-drive-in-an-electrical-vehicle-IJERTV3IS090599.pdf>.
7. Inci, M., Büyük, M., Demir, M. H., İlbey, G. (2021). A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 137. 110648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648>.
8. Weyers, C., Bocklisch, T. (2018). Simulation-based investigation of energy management concepts for fuel cell—battery—hybrid energy systems in mobile applications. *Energy Procedia*, No. 155, P. 295–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.048>.
9. Robledo, C. B., Oldenbroek, V., Abbruzzese, F. et al. (2018). Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and a residential building. *Applied Energy*, No. 215, P. 615–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.038>.
10. Hydrogen cars won't overtake electric vehicles because they're hampered by the laws of science. Published: June 3, 2020. URL: <https://theconversation.com/hydrogen-cars-wont-overtake-electric-vehicles-because-theyre-hampered-by-the-laws-of-science-139899>.
11. Mitra, U., Arya, A., Gupta, S., Gupta, A. K. (2022). A Brief Overview on Fuel Cell Electric Vehicles. 2022 *International Conference on Emerging Trends in Engineering and Medical Sciences* (ICETEMS), Nagpur, India, 2022, pp. 124–129, DOI: 10.1109/ICETEMS56252.2022.10093428.
12. Shvedchykova, I. O., Panasiuk, I. V., Demishonkova, S. A., Statsenko, D. V. (2024). Osoblyvosti pidhotovky maibutnix fakhivtsiv z elektrychnoi inzhenerii v umovakh zelenoho perekhodu [Features of the training of future specialists in electrical engineering in the conditions of the green transition]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and engineering*, № 2 (19), P. 68–78, DOI: 10.30857/2786-5371.2024.2.7 [in Ukrainian].
13. Wongyao, N., Therthianwong, A., Therthianwong, S. (2023). Performance of direct alcohol fuel cells fed with
6. Chaitanya S. R., Siva Kumar J. S. V., Rambabau M. Fuel cell supplied SVPWM controlled inverter fed PMSM drive in an electrical vehicle. *International Journal of Engineering Research and Technology* (IJERT). 2014. Vol. 3, No. 9. P. 806–812. URL: <https://www.ijert.org/research/fuel-cell-supplied-svpwm-controlled-inverter-fed-pmsm-drive-in-an-electrical-vehicle-IJERTV3IS090599.pdf>.
7. Inci M., Büyük M., Demir M. H., İlbey G. A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 137. 110648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648>.
8. Weyers C., Bocklisch T. Simulation-based investigation of energy management concepts for fuel cell—battery—hybrid energy systems in mobile applications. *Energy Procedia*. 2018. No. 155. P. 295–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.048>.
9. Robledo C. B., Oldenbroek V., Abbruzzese F. et al. Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and a residential building. *Applied Energy*. 2018. No. 215. P. 615–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.038>.
10. Hydrogen cars won't overtake electric vehicles because they're hampered by the laws of science. Published: June 3, 2020. URL: <https://theconversation.com/hydrogen-cars-wont-overtake-electric-vehicles-because-theyre-hampered-by-the-laws-of-science-139899>.
11. Mitra U., Arya A., Gupta S., Gupta A. K. A brief overview on fuel cell electric vehicles. 2022 *International Conference on Emerging Trends in Engineering and Medical Sciences* (ICETEMS), Nagpur, India, 2022. P. 124–129, DOI: 10.1109/icetems56252.2022.10093428.
12. Шведчикова І. О., Панасюк І. В., Демішонкова С. А., Стаценко Д. В. Особливості підготовки майбутніх фахівців з електричної інженерії в умовах зеленого переходу. *Технології та інжиніринг*. 2024. № 2 (19). С. 68–78. DOI: 10.30857/2786-5371.2024.2.7.
13. Wongyao N., Therthianwong A., Therthianwong S. Performance of direct alcohol

- mixed methanol/ethanol solutions. *Energy Convers Manage*, 2023, P. 76-81.
14. Rol vodnyu ta palyvni elementiv y svitoviy energetichniy sistemy [The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system]. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee01157e#!divAbstract> [in Ukrainian].
15. Cherkasov, I., Kravchenko, O. (2020). Electrohimichna charakteristika etanolovih palyvni elementiv z riznymy catalysatoramy [Electrochemical characteristics of ethanol fuel cells with different catalysts]. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen = Journal of physical research*, Vol. 1, P. 56–61 [in Ukrainian].
16. Golovko, N. V. (2014). Phyichni osnovi palyvni elementiv ta perspektiva yikh vikorystannya [Physical foundations of fuel cells and prospects for their use]. *Physico-matematichna osvita = Physical and mathematical education*, № 1 (6), P. 104–110 [in Ukrainian].
- fuel cells fed with mixed methanol/ethanol solutions. *Energy Convers Manage*. 2023. P. 76–81.
14. Роль водню та паливних елементів у світовій енергетичній системі. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee01157e#!divAbstract>.
15. Черкасов І., Кравченко О. Електрохімічна характеристика етанолових паливних елементів з різними каталізаторами. *Журнал фізичних досліджень*. 2020. Вип. 1. С. 56–61.
16. Головка Н. В. Фізичні основи паливних елементів та перспективи їх використання. *Фізико-математична освіта*. 2014. № 1 (6). С. 104–110.

SHVEDCHYKOVA IRYNA

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Computer Engineering
and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3005-7385>
Scopus ID: 6503887672
Researcher ID: O-2765-2018
E-mail: shvedchykova.io@knuud.edu.ua

SOLOSHYCH IRYNA

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,
Department of Ecology and Biotechnologies,
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National
University, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8842-5120>
Scopus ID: 56437747500
Researcher ID: ABE-2607-2021
E-mail: soloishych@gmail.com

PANASIUK IGOR

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Computer Engineering
and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6671-4266>
Scopus ID: 57219251131
Researcher ID: D-4255-2017
E-mail: panasjuk@knuud.edu.ua

MALYI YAROSLAV

PhD student,
Department of Computer Engineering
and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
E-mail: varikmaly2899@ukr.net

¹SHVEDCHYKOVA I. O., ¹PANASIUK I. V., ²SOLOSHYCH I. O., ¹MALYI Ya. S.

¹Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

²Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine

**RESEARCH OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF FUEL ELEMENTS
AS A POWER SOURCE FOR THE INNOVATIVE DEVELOPMENT
OF ENVIRONMENTALLY SAFE TRANSPORT**

Purpose. Development of methodological recommendations for conducting laboratory (practical) classes on the study of physical properties of fuel cells for use in the educational process of training applicants at various levels of higher education and in various educational programs.

Methodology. It involves processing experimental data obtained during research and identifying regularities regarding the influence of such factors as the concentration and temperature of the ethanol solution on the energy characteristics of the Micro-DEFS type fuel cell.

Findings. Methodical recommendations for performing practical (laboratory) works dedicated to studying the physical properties of ethanol fuel cells have been developed. Test results obtained during an experiment to determine the effect of ethanol concentration on the energy characteristics of an ethanol fuel cell are presented. It is shown that methodological recommendations have a universal character and are adapted to the capabilities and needs of applicants studying at different educational programs and levels of training: first (bachelor's) and second (master's).

Originality. With the use of an experimental sample of Horizon FCJJ-22 Fuel Cell type Micro-DEFS, methodological recommendations of a research orientation have been developed for applicants studying in various educational programs, the structure of which includes consideration of theoretical issues, in particular familiarisation with chemical reactions at the electrodes of a fuel cell, as well as conducting experimental studies to determine the influence of several factors on the operating characteristics of the fuel cell.

Practical value. The developed methodological recommendations for the study of the physical properties of ethanol fuel cells are intended for use during laboratory and/or practical classes with students of higher education who will study in various specialities and educational programs. The knowledge and skills acquired during such courses will become the basis for expanding the students' knowledge about new technologies in the field of alternative energy.

Keywords: alternative energy; renewable energy sources; ecological transport; experiment; innovation; fuel cell; hybrid power supply system; physical experiment.