

## ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ "ПОЛІКРЕМНІЄВА ФОТОБАТАРЕЯ – ПРОТОНООБМІННИЙ ЕЛЕКТРОЛІЗЕР"

Г.Л. Карпчук<sup>1</sup>, магістр, М.О. Будько<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», 03056, пр-т. Перемоги, 37, м. Київ, Україна.

<sup>2</sup>Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна.

*З огляду на екологічні проблеми, проблеми балансування енергосистеми, а також концепцію «Зеленого» переходу України, постає актуальним розробка автономної енергоефективної сонячно-водневої системи, яка матиме змогу безперервно забезпечувати потреби споживача.*

*Мета роботи полягає у обґрунтуванні параметрів роботи системи «фотобатарея – протонобмінний електролізер» при перетворенні сонячної енергії у «зелений» водень.*

*Задачі дослідження наступні: аналіз підходів реалізації сонячно-водневих систем; розробка математичної моделі комплексної сонячно-водневої системи та її реалізація у програмному середовищі MATLAB; проведення експериментального дослідження для перевірки математичної моделі сонячно-водневої комплексної системи; аналіз та порівняння отриманих результатів та розробити рекомендації по підвищенню ефективності роботи системи «фотобатарея – протонобмінний електролізер».*

*Наукові положення, висновки та рекомендації, що сформульовані в роботі, базуються на результатах експериментальних досліджень, теоретичних і практичних положеннях про перетворення енергії Сонця в енергію водня, положеннях системного аналізу, статистичного аналізу в середовищі Microsoft Office Excel, математичних методів моделювання енергетичних процесів в програмному середовищі MATLAB.*

*Отримано математичну модель роботи системи «фотобатарея – протонобмінний електролізер», яка дозволяє аналізувати вплив інтенсивності сонячного випромінювання на показники виходу у реальних умовах.*

*Розроблено структурну блок-схему застосування автономної системи «фотобатарея – протонобмінний електролізер», яка складається з 4 можливих варіантів реалізації. Розроблені принципові електричні схеми фотобатареї, протонобмінного електролізера, комплексної системи «полікремнієва фотобатарея – протонобмінний електролізер», протонобмінного електролізера для зняття характеристики його коефіцієнта корисної дії. Розроблено методику постановки експерименту та виконання досліджень системи «полікремнієва фотобатарея – протонобмінний електролізер». Бібл. 5, табл. 2, рис. 9.*

**Ключові слова.** фотоелектричний модуль, протонобмінний електролізер, сезонне акумулювання енергії, відновлювані джерела енергії.

## FEATURES OF OPERATION OF THE SYSTEM "POLY SILICON PHOTOVOLTAIC MODULE - PROTON EXCHANGE MEMBRANE ELECTROLYSER"

Н. Karpchuk<sup>1</sup>, master, М. Budko<sup>1,2</sup>, candidate of technical science, assistant professor

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 03056, 37 Peremohy Av., Kyiv, Ukraine.

<sup>2</sup>Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine.

*Given the environmental problems, the problems of energy system balancing, as well as the concept of "Green" transition of Ukraine, it is important to develop an autonomous energy-efficient solar-hydrogen system that will be able to continuously meet consumer needs.*

*The purpose of the work is to substantiate the operating parameters of the system "photovoltaic module - proton exchange membrane electrolyzer" in the conversion of solar energy into "green" hydrogen.*

*The objectives of the study are as follows: analysis of approaches to the implementation of solar-hydrogen systems; development of a mathematical model of a complex solar-hydrogen system and its implementation in the MATLAB; carrying an experimental study to verify the mathematical model of the solar-hydrogen complex system; analysis and comparison of the obtained results and develop recommendations for improving the efficiency of the system "photovoltaic module - proton exchange membrane electrolyzer".*

*Scientific provisions, conclusions and recommendations formulated in the work are based on the results of experimental research, theoretical and practical provisions on the conversion of solar energy into hydrogen energy, provisions of system analysis, statistical analysis in Microsoft Office Excel, mathematical methods for modeling energy processes in MATLAB.*

A mathematical model of the system "photovoltaic module - proton exchange membrane electrolyzer" is obtained, which allows to analyze the influence of the intensity of solar radiation on the indicators of hydrogen yield in real conditions. The structural block diagram of application of the autonomous system "photovoltaic module - proton exchange membrane electrolyzer" which consists of 4 possible options of implementation is developed. The basic electrical schemes of the photovoltaic cell, proton exchange membrane electrolyzer, complex system " photovoltaic module - proton exchange membrane electrolyzer", proton exchange membrane electrolyzer for removal of the characteristic of its efficiency are developed. A method for setting up an experiment and performing research on the system "polysilicon photovoltaic module - proton exchange membrane electrolyzer" has been developed. Ref. 5, tab. 2, fig. 9.

**Keywords:** photovoltaic module, proton exchange membrane electrolyzer, seasonal energy storage, renewable energy sources.



Г.Л. Карпчук  
H. Karpchuk

**Відомості про автора:** магістр, науковець кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», науковий магістр.

**Освіта:** Вища. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Спеціальність «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Наукова сфера:** відновлювані джерела енергії, електроенергетика.

**Публікації:** 10 наукових праць.

**ORCID:** 0000-0001-7062-2727

**Контакти:** (063)843 63 14

**e-mail:** [annakarpchuk@gmail.com](mailto:annakarpchuk@gmail.com)

**Author information:** Master of the Department Renewable Energy Sources of Faculty of Electric Power Engineering and Automatics of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

**Education:** Higher. The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Specialty is "Electric power, electrical engineering and electromechanics".

**Research area:** renewable energy sources, electric power.

**Publications:** 10 scientist works.

**ORCID:** 0000-0001-7062-2727

**Contacts:** (063)843 63 14

**e-mail:** [annakarpchuk@gmail.com](mailto:annakarpchuk@gmail.com)



М.О. Будько  
M. Budko

**Відомості про автора:** кандидат технічних наук, старший викладач кафедри відновлюваних джерел енергії факультету електроенергетичної та автоматичної Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», старший науковий співробітник відділу відновлюваних органічних енергоносіїв Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

**Освіта:** Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», інженер-біотехнолог за фахом «Промислова біотехнологія».

**Наукова сфера:** відновлювані джерела енергії, електроенергетика, біоенергетика.

**Публікації:** 22.

**ORCID:** 0000-0003-0928-1657

**Контакти:** +38 (044)204-81-91

**e-mail:** [fialka93@gmail.com](mailto:fialka93@gmail.com)

**Author information:** candidate of technical science, assistant professor of the Department of Renewable Energy Sources of the Faculty of Electric Power Engineering and Automatics of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", Senior Researcher of Renewable Organic Energy sources Department of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.

**Education:** National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", engineer-biotechnologist in the specialty "Industrial biotechnology".

**Research area:** renewable energy sources, electric power, bioenergy.

**Publications:** 22.

**ORCID:** 0000-0003-0928-1657

**Contacts:** +38 (044) 204-81-91

**e-mail:** [fialka93@gmail.com](mailto:fialka93@gmail.com)

## Перелік використаних позначень та скорочень:

$I_{\phi}$  – фотострум ФЕМ;

$I_0$  – темновий струм насичення ФЕМ;

$\Phi$  – сонячна інсоляція;

$A$  – коефіцієнт неідеальності діода;

$I_0$  – зворотний струм насичення діода при стандартній температурі;

$E_{36}$  – зворотний потенціал реакції;

$E_i$  – стандартний потенціал для даної реакції;

$k_{exH_2}$  – електрохімічний еквівалент;

$m$  – маса водню;

$T$  – температура.

**Вступ.** У 2020 році було оприлюднено «Концепцію «Зеленого» енергетичного переходу України до 2050», де однією з основних цілей є до 2050 року досягти 70% частки ВДЕ у виробництві електроенергії, з яких до 15% має складати її виробництво за рахунок дахових СЕС в домогосподарстві та бізнесі, а також збільшення децентралізованого електроживлення. Якщо врахувати те, що у зв'язку зі збільшенням частки ВДЕ у енергобалансі країни постає питання балансування об'єднаної енергомережі, то в подальшому дана проблема ще більше загостриться. Тому є актуальним пошук шляхів уникнення балансування об'єднаної енергомережі, але при цьому продовжити нарощувати потужності відновлюваних джерел енергії. Один з можливих шляхів уникнення проблеми балансування є застосування автономних комплексних сонячно-водневих систем, які здатні гарантовано забезпечувати споживача протягом року. Для успішного впровадження автономних сонячно-водневих систем необхідно мати можливість оцінити економічну доцільність будівництва такої установки на певній місцевості.

**Постановка завдання.** Мета даної роботи полягає у обґрунтуванні параметрів роботи системи «фотобатарея – протонобмінний

електролізер» при перетворенні сонячної енергії у «зелений» водень.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

- аналіз підходів реалізації сонячно-водневих систем;
- розробка математичної моделі комплексної сонячно-водневої системи та її реалізація у програмному середовищі MATLAB;
- проведення експериментального дослідження для перевірки математичної моделі сонячно-водневої комплексної системи;
- аналіз та порівняння отриманих результатів та розробити рекомендації по підвищенню ефективності роботи системи «фотобатарея – протонобмінний електролізер».

**Виклад основного матеріалу.** В Україні одним з можливих підходів реалізації сонячно-водневих систем – це автономні системи з сезонним гарантованим акумулюванням енергії. Така система здатна забезпечувати потреби споживача безперервно протягом року і у ній водень є сезонним акумулятором електроенергії, який накопичується в період надлишкового виробітку електроенергії ФЕС.

Автономну сонячно-водневу систему для забезпечення безперервного електроживлення можливо реалізувати за схемою рис. 1 по наступним варіантам:

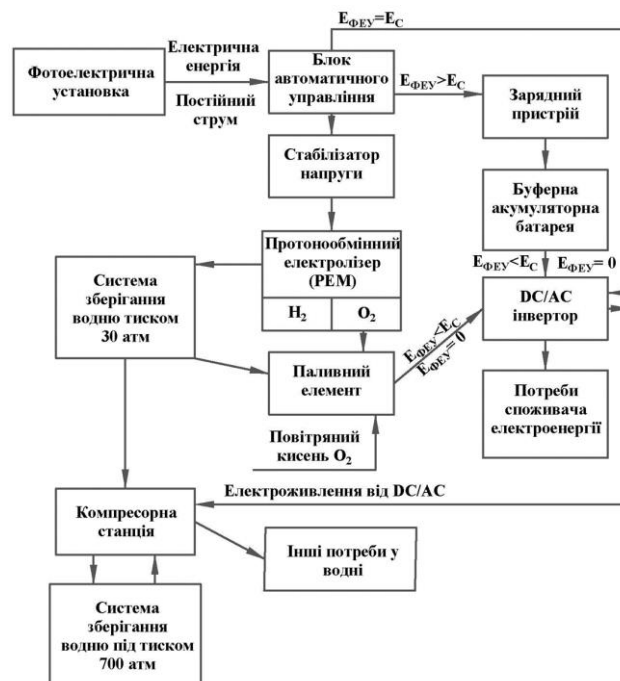


Рис. 1. Блок-схема реалізації автономної сонячно-водневої системи [3].

Fig. 1. Block diagram of the implementation of an autonomous solar-hydrogen system [3].

1. Ідеальний – реалізується за умови безпосереднього електроживлення від фотоелектричної установки ( $E_{\text{ФЕУ}} = E_c$ ). Тобто енергія сонячного випромінювання за рахунок фотоелектричної установки перетворюється в електроенергію постійного струму, яка подається на блок автоматичного управління. Після цього через DC/AC перетворювач реалізується енергоживлення споживача.

2. Надлишковий – реалізується за умови електроживлення від фотоелектричної установки з паралельним виробництвом «зеленого» водню та зарядом буферної акумуляторної батареї ( $E_{\text{ФЕУ}} > E_c$ ). У такому випадку електроенергія через блок автоматичного управління базового енергозабезпечення споживача направляється на виробіток водню та заряд буферної акумуляторної батареї. Для виробітку водню електроенергія з блоку автоматичного управління через стабілізатор напруги подається на електролізер, де відбувається електрохімічний розклад води на водень і кисень. Тиск на виході з електролізера складає 30 атм, що дозволяє його без компресора подавати в систему зберігання низького тиску. З метою забезпечення сезонного балансу виробітку та споживання електроенергії та зменшення об'єму акумуляторних баків і відповідно площ під реалізацію системи водень під тиском 30 атм за

допомогою компресорної станції направляється в систему зберігання високого тиску 700 атм.

3. Недостатній – реалізується за умови, коли  $E_{\text{ФЕУ}} < E_c$  електроживлення від фотоелектричної установки з компенсацією виробітку паливним елементом та буферною акумуляторною батареєю.

4. З нульовою первинною генерацією – реалізується за умови, коли  $E_{\text{ФЕУ}} = 0$  та являє собою електроживлення від паливного елемента та буферної акумуляторної батареї через DC/AC інвертор. Дана схема може реалізуватися у темну пору доби і за умови наявного навантаження від споживача, при цьому відбувається використання водню, накопиченого в ємності високого тиску.

Таким чином, на практиці можлива реалізація усіх варіантів безперервного електроживлення споживача.

Перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну можливе при використанні явища внутрішнього фотоефекту, що лежить в основі принципу роботи фотоелектричного модуля (ФЕМ). Математична модель ФЕМ будується на основі його еквівалентної електричної схеми заміщення (рис. 2) та математичної залежності, що відображає її вихідну вольт-амперну характеристику (ВАХ).

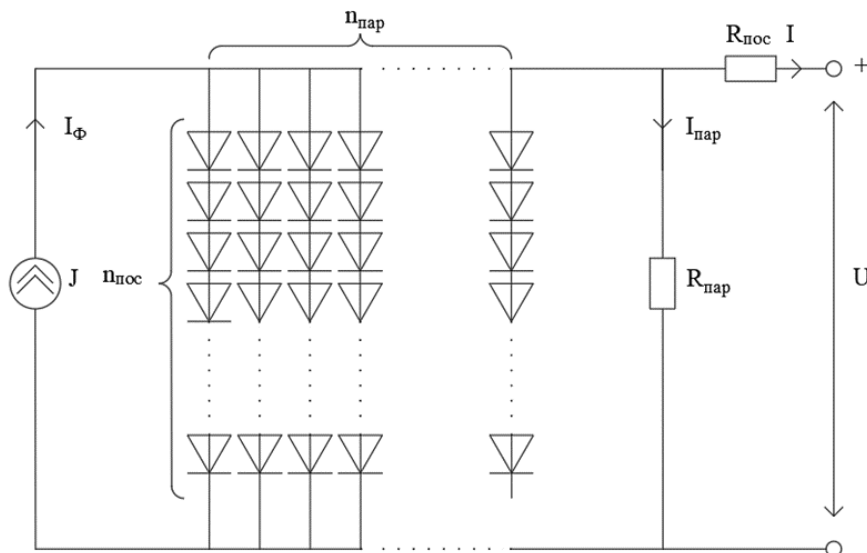


Рис. 2. Електрична схема заміщення одніодиодної моделі фотоелектричного модуля.

Fig. 2. The electrical equivalent circuit of a single-diode model of a photovoltaic module.

$$I = I_{\phi} - I_{\theta} \left( e^{\frac{q}{kTA} \frac{(U + IR_{noc})}{n_{noc}}} - 1 \right) - \frac{U + IR_{noc}}{R_{нар}}, \quad (1)$$

де:  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд електрона;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана;  $T$  – робоча температура ФЕМ, К;  $R_{нар}$  – шунтуючий опір ФЕМ, Ом;  $R_{noc}$  – послідовний опір ФЕМ, Ом;  $I$  – вихідний струм ФЕМ, А;  $U$  – вихідна напруга ФЕМ.

Фотострум ФЕМ прямопропорційно залежить від сонячної інсоляції, що потрапляє на її поверхню та робочої температури ФЕМ і визначається наступним чином [2]

$$I_{\phi} = [I_{кз} + K \cdot (T - T_c)] \cdot \Phi, \quad (2)$$

де:  $I_{кз}$  – струм короткого замикання ФЕМ при 25 °С та 1 кВт/м<sup>2</sup>, А;  $K$  – температурний коефіцієнт струму короткого замикання ФЕМ;  $T_c$  – стандартна температура ФЕМ, К.

У свою чергу, на зміну зворотного струму насичення діода впливає температура ФЕМ і він виражається наступним чином [2]:

$$I_{\theta} = I_0 \left( \frac{T}{T_c} \right)^3 \cdot e^{\frac{qE_G}{kA} \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T} \right)}, \quad (3)$$

де:  $E_G$  – ширина забороненої зони напівпровідника ФЕМ, еВ.

Зворотній струм насичення діода при стандартній температурі визначається наступним чином [5]:

$$I_0 = \frac{I_{кз}}{e^{\frac{qU_{x.x.}}{n_{noc} kAT}} - 1}, \quad (4)$$

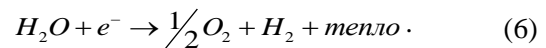
де:  $U_{x.x.}$  – напруга холостого ходу ФК, В;  $n_{noc}$  – кількість послідовно з'єднаних комірок, шт.

У свою чергу, ширина забороненої зони кремнієвого напівпровідника визначається згідно [1]

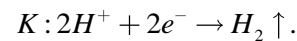
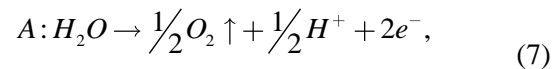
$$E_G = 1,17 - \frac{4,73 \cdot 10^{-4} T^2}{T + 636}. \quad (5)$$

Математична модель виробництва водню на основі використання ПЕЛ відображається його електричною еквівалентною схемою заміщення, ВАХ та хімічною характеристикою.

Загальна хімічна реакція процесу електролізу води наступна:



Електродні хімічні реакції на аноді (А) та катоді (К) відповідно:



Спрощена еквівалентна схема заміщення ПЕЛ показана на рис. 3.

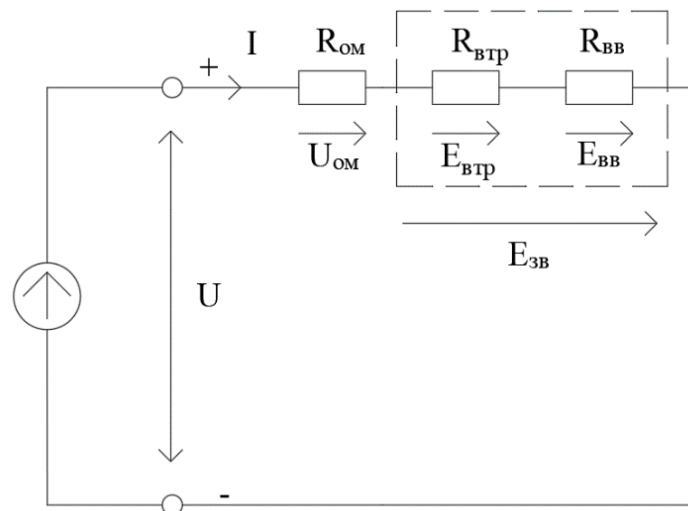


Рис. 3. Електрична схема заміщення ПЕЛ.

Fig. 3. The electrical equivalent circuit of a proton exchange membrane electrolyzer.

Вольт-амперна характеристика протонообмінного електролізера має наступний вигляд [4]:

$$U = IR_{om} + E_{36}, \quad (8)$$

де  $U$  – напруга, що прикладається до ПЕЛ, В;  $I$  – струм, що протікає через ПЕЛ, А;  $R_{om}$  – опір електролізера, Ом.

Зворотний потенціал хімічної реакції визначається з рівняння Нернста:

$$E_{36} = E_i + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0,5}}{a_{H_2O}} \right), \quad (9)$$

де  $R = 8,314$  Дж·моль/К – універсальна газова стала;  $n = 2$  – кількість електронів, що беруть участь в реакції;  $F = 96485,33$  Кл/моль – число Фарадея;  $P_{H_2}$  – парціальний тиск водню, Па;  $P_{O_2}$  – парціальний тиск кисню, Па;  $a_{H_2O} = 1$  – активність речовини.

Стандартний потенціал реакції розділення води може змінюватися в залежності від температури і визначається згідно виразу:

$$E_i = \frac{\Delta G}{nF}, \quad (10)$$

де  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$  – зміна енергії Гіббса, кДж/моль;  $\Delta H$  – зміна ентальпії під час проходження реакції, кДж/моль;  $\Delta S$  – зміна ентропії під час проходження реакції, Дж/(моль·К);

За використання двох законів Фарадея можна легко визначити об'єм водню, який буде отримано при проходженні через електролізер певної величини струму за певний період.

За першим законом Фарадея визначається електрохімічний еквівалент (11) водню та його маса (12), що виділяється під час проходження процесу електролізу:

$$k_{exH_2} = \frac{M}{nF}, \quad (11)$$

$$m = k_{exH_2} It, \quad (12)$$

де  $M = 2,0158$  г/моль – молярна маса водню;  $t$  – час, протягом якого проходить електроліз, с.

Об'єм водню, що був отриманий під час електролізу, визначається наступним чином:

$$V = \frac{V_m \cdot m}{M}, \quad (13)$$

де  $V_m$  – молярний об'єм, л/моль.

У свою чергу молярний об'єм може визначатися в залежності від температури за наступним виразом:

$$V_m = \frac{R \cdot T}{p}, \quad (14)$$

де  $p$  – тиск газу і приймається рівним 1 атм.

Електрична потужність, яка прикладається до електролізера з урахуванням (8-14) може бути визначена наступним чином:

$$P = UI = \left( \frac{nFV}{tV_m} \right)^2 R_{om} + \frac{\Delta G \cdot V}{tV_m} + \frac{RTV}{tV_m} \cdot \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0,5}}{a_{H_2O}} \right). \quad (15)$$

Для проведення дослідження генерації водню на основі використання комплексної системи «полікремнієва фотобатарея – протонообмінний електролізер» використовується наступне основне обладнання:

1. Фотоелектричний міні-модуль GH165X135, технічні характеристики якого наведено в табл. 1;
2. Протонообмінний міні-електролізер з технічними характеристиками, що наведені в табл. 2.

Таблиця 1. Технічні характеристики ФЕМ GH165X135.

Table 1. Specification of PV-module GH165X135.

Параметр	Величина	Од. вим.
Тип	полікремнієва	
Потужність	3,5	Вт
Максимальна робоча напруга	6	В
Максимальний робочий струм	0,6	А
Кількість послідовно з'єднаних ФК	4	шт
Кількість паралельно з'єднаних ФК	3	шт
Стандартна температура ФЕМ	25	°С

Таблиця 2. Технічні характеристики ПЕМ ЕЛ Horizon.

Table 2. Specification of PEM electrolyzer Horizon.

Параметр	Величина	Од. вим.
Тип	протонообмінний	
Вхідна напруга	1,8-3	В (п.с)
Вхідний струм	0,7	А
Номінальний об'єм виробництва водню при струмі 1 А	7	мл/хв
Номінальний об'єм виробництва кисню при струмі 1 А	3,5	мл/хв

Також для постановки експерименту використовувалось наступне допоміжне обладнання:

1. Ємності для накопичення та вимірювання рівня виробництва відповідно водню та кисню;
2. Понижуючий DC/DC перетворювач XL4015 5A;
3. Здвоєний світлодіодний цифровий вольтметр-амперметр 100 В 10 А – 2 шт.

4. Живлення для здвоєного вольтметра-амперметра з постійною напругою 4,5В;

5. Трубки для з'єднання електролізера з ємностями та заглушки;

6. Ручний вимикач напруги, що встановлюється перед електролізером;

7. Клемні з'єднувальна колодка DG8HS-1.2-12P-17-100АН;

8. З'єднуючі провoda.

Дослідження проводиться відповідно до принципової схеми, що наведена на рис. 4.

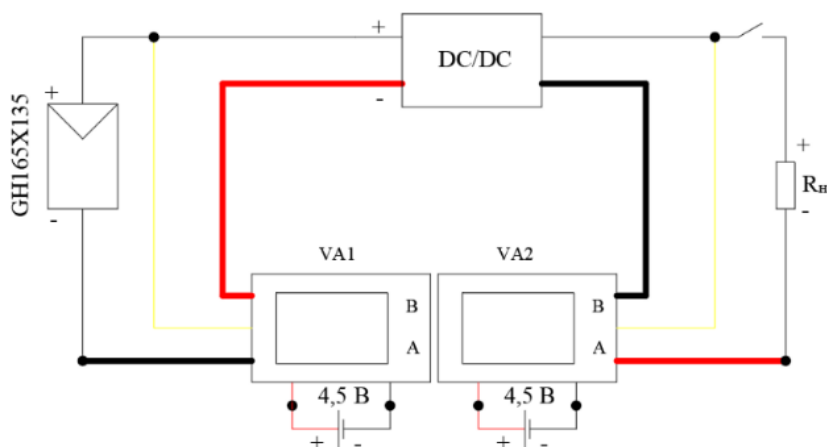


Рис. 4. Принципова електрична схема комплексної системи «полікремнієва фотобатарея – протонообмінний електролізер».

Fig. 4. Schematic electrical circuit of the complex system "silicon photovoltaic module - proton exchange membrane electrolyzer".

При накладанні теоретично та практично отриманих залежностей, наведених зведені графіки:

1. Залежності струму ФЕМ GH165X135 від інсоляції (рис. 6);

2. Кривої залежності виробітку водню від інсоляції (рис. 8);

3. Графіки залежності потужності від інсоляції (рис.9).



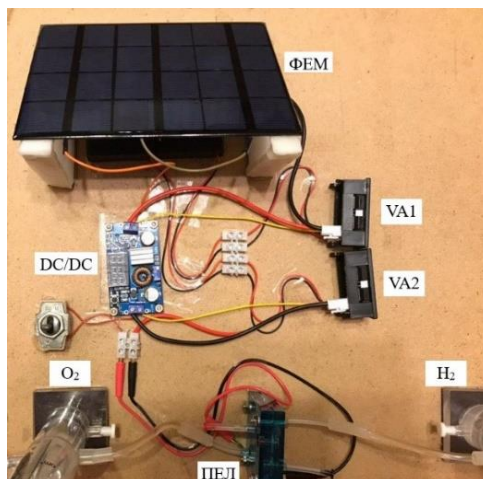


Рис. 5. Зовнішній вигляд комплексної системи «полікремнієва фотобатарея – протонообмінний електролізер».

Fig. 5. Appearance of the complex system "polysilicon photovoltaic module - proton exchange membrane electrolyzer".

З рис. 6 видно, що при збільшенні рівня інсоляції, а відповідно і струмів, збільшується відхилення експериментальної кривої, а відповідно і похибка, яка в середньому складає 29,92 %. Таке значне відхилення експериментальної кривої від теоретичної пояснюється тим, що однодіодна модель ФЕМ не здатна з високою точністю змоделювати досліджуваний ФЕМ GH165X135 через неідеальність його р-п переходу, що відображається присутністю ефекту рекомбінації електронів. Тому, щоб мати можливість реально оцінити отримані результати також проводиться

теоретичний розрахунок за значеннями струмів, що були отримані експериментально.

При накладанні залежностей виходу водню від інсоляції видно, що експериментальні дані та розрахунково-експериментальні дані по суті накладаються одне на одне, оскільки у середньому відхилення складає 3,1%. Якщо порівняти характер поведінки отриманих кривих, то можна помітити, що він у них ідентичний з єдиною різницею, що крива побудована за експериментальними даними має більш пологий характер.

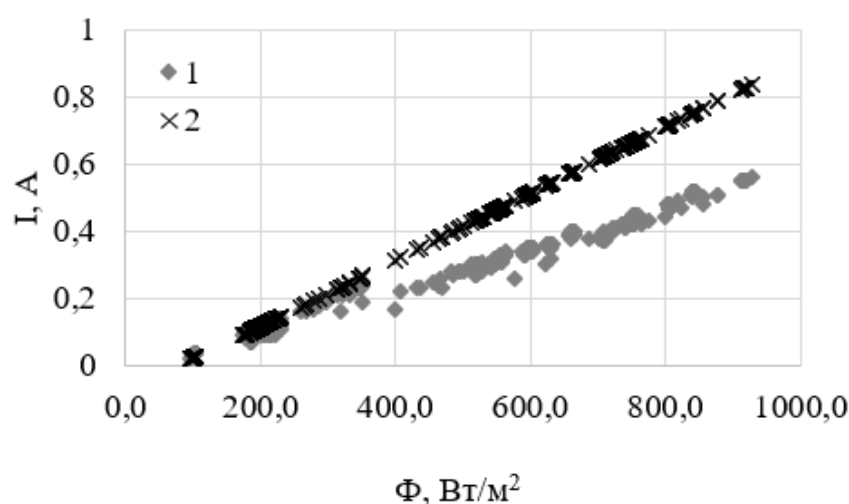


Рис. 6. Залежність струму ФЕМ GH165X135 від інсоляції: 1 – за експериментальними даними; 2 – за розрахунково-теоретичними даними.

Fig. 6. Dependence of PV module GH165X135 current on insolation: 1 – experimental data; 2 – calculation and theoretical data.



Більш того, графіку залежності виробітку водню від інсоляції для всіх кривих притаманна однакова поведінка. При малих значеннях інсоляції (від  $100 \text{ Вт/м}^2$  до  $500 \text{ Вт/м}^2$ ), а відповідно і струмах, водень генерується повільно, а при поступовому збільшенні її значень, виробіток

водню стрімко зростає до певного значення. Такий характер даних кривих може бути пояснений за допомогою зміни коефіцієнта корисної дії в залежності від споживаного струму (рис. 7).

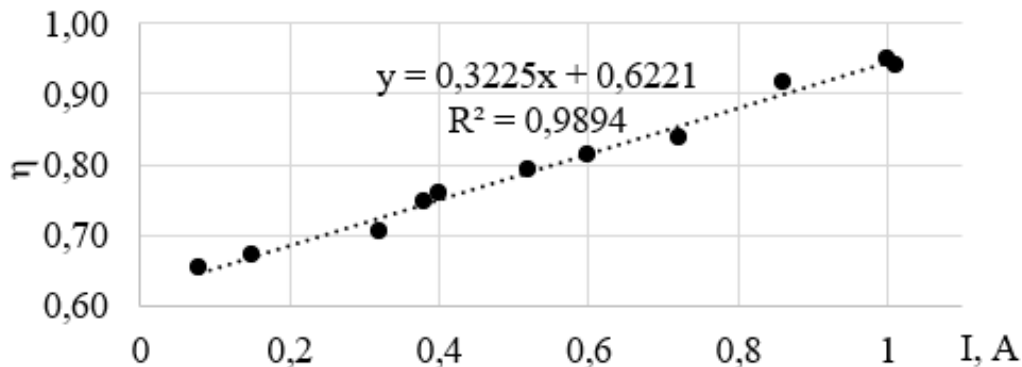


Рис. 7. Результати дослідження коефіцієнту корисної дії ПЕЛ: залежність коефіцієнту корисної дії від споживаного струму.

Fig. 7. The results of the study of the efficiency of PEM electrolyzer: the dependence of the efficiency on the current consumption.

Як результат проведеного дослідження ККД електролізера отримано, що при зростанні струму відповідно збільшується його ККД, при чому дана залежність є лінійною. Таким чином, якщо накласти фактор ККД на отримані результати, то можна впевнитися, що у області малих значень інсоляції його величина порядку 67%, але при збільшенні значень інсоляції він починає зростати до 95%.

При накладанні графіків потужностей генерації та споживання можна помітити, що:

1. Споживана потужність за експериментальними та розрахунково-експериментальними даними співпадають, з єдиною різницею, що останній має більш зосереджений розподіл точок;

2. Споживана потужність за теоретично-розрахунковими даними має відхилення, яке пов'язане з моделюванням ФЕМ.

3. Розрахунково-теоретична потужність ФЕМ має відхилення від експериментальної аналогічно до пункту 2.

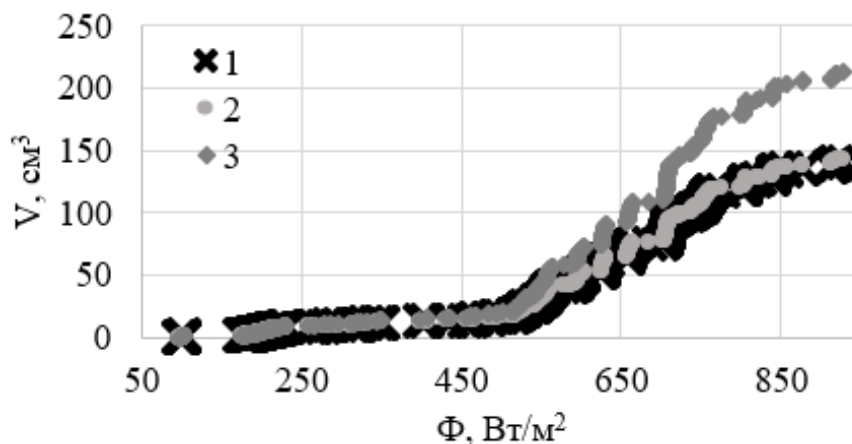
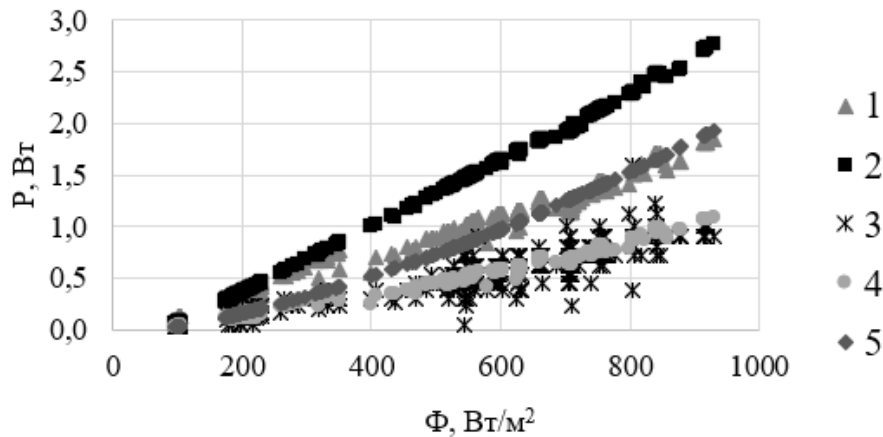


Рис. 8. Залежність виробітку водню від інсоляції: 1 – за експериментальними даними; 2 – за розрахунково-експериментальними даними; 3 – за теоретично-розрахунковими даними.

Fig. 8. Dependence of hydrogen production on insolation: 1 – experimental data; 2 – calculated and experimental data; 3 – theoretical and calculated data.

Аналізуючи отримані результати системи «фотоелектрична батарея – представлений на рис. 6-9 можна зробити висновки, що запропонований математичний апарат дозволяє проводити моделювання комплексної системи «фотоелектрична батарея – протонообмінний електролізер» і є масштабованим.



**Рис. 9. Залежність потужності від інсоляції:** 1 – генерована потужність ФЕМ за експериментальними даними; 2 – генерована потужність ФЕМ за теоретичними даними; 3 – споживана потужність ПЕЛ за експериментальними даними; 4 – споживана потужність ПЕЛ за розрахунково-експериментальними даними; 5 – споживана потужність ПЕЛ за розрахунково-теоретичними даними.

**Fig. 9. Dependence of power on insolation:** 1 – experimental data the PV module generated power; 2 – data the PV module generated power; 3 – experimental data of PEM electrolyzer power consumption; 4 – calculation and experimental data of PEM electrolyzer power consumption; 5 - calculation and theoretical data of PEM electrolyzer power consumption.

Для підвищення загальної ефективності установки необхідно забезпечити роботу електролізера при густинах струму 0,6-2 А/см<sup>2</sup> (або, для нашого дослідження, струмами від 0,6 до 1 А). Оскільки інтенсивність сонячного випромінювання має змінний характер, а відповідно і струм, що генерується ФЕМ, то можна запропонувати встановити контролер з перетворювачем по струму. На контролері встановити мінімальне значення струму, при якому повинен працювати електролізер. При проходженні струму на контролер подається сигнал з його величиною. Якщо вона менше усталеного значення, то струм підвищується до величини усталеного значення і далі подається на електролізер, якщо більше – безпосередньо живить електролізер.

Також для підняття загальної ефективності установки необхідно встановити МРРТ контролер, який буде підвищувати ефективність роботи фотобатареї шляхом пошуку точки максимальної потужності у всьому діапазоні рівнів освітленості. Якщо напруга у цій точці перевищує необхідне значення для роботи навантаження, то вона знижується, а надлишок енергії перетворюється у струм.

Таким чином, можна досягти високої ефективності генерації та накопичення водню незалежно від рівня освітленості.

**Висновки.** Проаналізовано існуючі підходи щодо реалізації сонячно-водневих систем та розроблено схему сезонного безперервного електроживлення споживача. Розроблено математичну модель комплексної системи «полікремнієва фотобатарея – протонообмінний електролізер». Експериментально-дослідним шляхом перевірено роботу математичної моделі комплексної сонячно-водневої системи і виявлено, що вона дозволяє отримувати достовірні дані, а відхилення між моделюванням та експериментом не перевищує 10%. Запропоновано шляхи до підвищення ефективності даної системи. Розроблено електричну схему заміщення системи «полікремнієва фотобатарея – протонообмінний електролізер», яка може використовуватись на практиці. У результаті експериментальних та теоретичних досліджень встановлено, що коефіцієнт корисної дії перетворення енергії сонячного випромінювання в енергію «зеленого водню» як універсального енергоносія знаходиться в межах 15,2%. Отримане рівняння залежності коефіцієнта корисної дії від величини струму, яке має лінійний характер, і виявлено, що

з підвищенням струму збільшується і ККД електролізера. Отримані рівняння залежності виробітку водню від інтенсивності сонячного випромінювання, які мають нелінійний характер у області малих значень інсоляції.

1. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Наука. 1989. 310 с.

2. Tsai H.-L. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. World Congress on Engineering and Computer Science. 2008. 6 p.

3. Карпчук Г.Л., Будько В.І. Особливості реалізації автономної сонячно-водневої системи. Міжнародний науково-технічний журнал молодих вчених, аспірантів і студентів «СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ». 2019. № 5. С. 538-540.

4. Albarghot M., Sasi M., Rolland L. MATLAB/Simulink Modeling and Experimental Results of a PEM Electrolyzer Powered by a Solar Panel. Journal of Energy and Power Engineering. 2016. Vol. 10. Pp. 779-785.

5. Samer S., Massoud A, Benammar M., Shehab A. A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing Sim Power Systems. Toolbox. Journal of Energy and Power Engineering. 2012. Vol. 6. Pp. 1965-1975.

## REFERENCES

1. Andreev V.M. Fotoelektricheskoe preobrazovanye kontsentryrovannoho solnechnoho yzluchenyaya. [Photoelectric conversion of concentrated solar extraction]. Nauka. 1989.310 p. [in Russian].

2. Tsai H.-L. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. World Congress on Engineering and Computer Science. 2008. 6 p.

3. Karpchuk H.L., Budko V.I. Osoblyvosti realizatsiyi avtonomnoyi sonyachno-vodnevoyi systemy. [Features of the implementation of an autonomous solar-hydrogen system]. Mizhnarodnyy naukovo-tekhnichnyy zhurnal molodykh vchenykh, aspirantiv i studentiv «Suchasni problemy elektroenerhotekhniki ta avtomatyky». 2019. No. 5. Pp. 538-540. [in Ukrainian].

4. Albarghot M., Sasi M., Rolland L. MATLAB/Simulink Modeling and Experimental Results of a PEM Electrolyzer Powered by a Solar Panel. Journal of Energy and Power Engineering. 2016. Vol. 10. Pp. 779-785. [in English].

5. Samer S., Massoud A, Benammar M., Shehab A. A Matlab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing Sim Power Systems. Toolbox. Journal of Energy and Power Engineering. 2012. Vol. 6. Pp. 1965-1975. [in English].

Стаття надійшла до редакції 17.06.20

Остаточна версія 21.09.20