

*ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА*

УДК 620.92

DOI: 10.31388/2078-0877-20-2-231-240

**ДОСЛІДЖЕННЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ НА ОСНОВІ
ЦИЛІНДРИЧНИХ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ ФОТОМОДУЛІВ**

Галько С. В., к.т.н.,

ORCID: 0000-0001-7991-0311

Самойчук К. О., д.т.н.,

ORCID: 0000-0002-3423-3510

*Таврійський державний агротехнологічний університет**імені Дмитра Моторного*

Тел. (067) 42-17-508

Постановка проблеми. У всьому світі постійно зростає попит на електроенергію. Для його задоволення здійснюється розвиток альтернативних джерел енергії з використанням сонячної, вітрової, геотермальної та інших джерел енергії. Одним з ключових рішень є розвиток нових технологій перетворення сонячної енергії [1]. Сонячна енергія є найбільш ефективним та чистим джерелом енергії, а також дешевим і вічним джерелом відновлюваної енергії, за допомогою якого можна подолати залежність суспільства від звичайних видів палива та ресурсів [2]. У роботі [3] розроблені рекомендації щодо застосування сонячних станцій: кондиціонування, охолодження, нагрівання, використання в якості зарядних пристроїв тощо.

За існуючих темпів нарощування встановленої потужності сонячних фотоелектричних станцій в Україні вже до 2030 року їх сумарна потужність досягне 8,5 ГВт [4]. Одним з варіантів збереження існуючих темпів приросту потужності фотоенергетики в Україні є розвиток та популяризація автономних систем електроспоживання. Досить привабливим у цьому ракурсі є створення автономних зарядних станцій (АЗС) електромобілів (ЕМ) різних типів (як повністю електричних, так і гібридів, що можуть підзаряджатись) [5].

Країни Європи, Китай і Індія заявили, що відмовляться від продажу машин з двигунами внутрішнього згорання через 10-25 років, та і самі автовиробники почали орієнтуватися на виробництво гібридів і ЕМ. Плани переходу на електричні приводи оголосили BMW, Daimler і Volkswagen Group та інші. До кінця поточного року очікується, що кількість ЕМ перетне позначку в 5 млн. До 2035 року кожний четвертий автомобіль в Україні буде електричним, прогнозує центр Разумкова [6,7].

В Україні на 1.01.2019 р. нараховувалося 1179 станцій підзарядки ЕМ. Інфраструктуру АЗС в Україні складають як станції,

спеціалізовані тільки на підзарядці електрокарів, так і позамережеві зарядки біля ресторанів, готелів та інших закладів. Водночас можна зазначити, що в Україні відчувається гостра нестача швидких АЗС - їх в десять разів менше, ніж звичайних [8].

Аналіз останніх досліджень. На сьогоднішній день існують практичні приклади реалізації таких АЗС на основі плоских сонячних батарей. Зокрема, в рамках проекту “Smart Solar Charging” компанії LomboXnet в Утрехті (Нідерланди) реалізована АЗС ЕМ. Вона має 20 пунктів заряджання, підключених до фотоелектричних установок (ФЕУ) на 200 модулів і системою буферних акумуляторних батарей (АБ) Tesla Powerpack потужністю 400 кВт та енергоємністю 800 кВт·год. [6]. Компанія Power (США) реалізує проекти АЗС ЕМ на основі ФЕУ номінальною потужністю 16,8 кВт та максимальним зарядним струмом до 40 А [9]. Така розробка є актуальною для ЕМ з невеликою енергоємністю АБ. За більших значень енергоємності АБ ЕМ зростає час заряджання транспортного засобу, що не завжди є зручним. Компанія Envision Solar’s (США) запатентувала та реалізує власну розробку мобільної (пересувної) станції ЕМ, що використовує ФЕУ та буферну АБ [10]. На відміну від існуючих аналогів ця розробка може легко переміщуватися на нове місце, де є необхідність у заряджанні ЕМ, однак потужність її не перевищує 3 кВт, що в свою чергу свідчить про тривалий режим заряджання.

Над проблемою створення АЗС з використанням ФЕУ працюють закордонні науковці [4,5], які в своїх роботах намагаються оптимізувати структуру АЗС, а також зменшити негативний вплив на роботу об’єднаної енергосистеми в разі підключення нових потужностей на основі відновлюваних джерел.

В роботі [11] обґрунтована можливість створення локальних енергетичних мереж для зарядки АБ ЕМ на основі гібридних сонячних фотоелектричних панелей (ГСФП). Для підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) ГСФП, замість плоских сонячних батарей, запропоновано використовувати когенераційні фотоелектричні модулі (ФЕМ) циліндричної форми, що охолоджуються рідиною. Це відкриє можливість створення ГСФП для одночасного отримання електричної і теплової енергії.

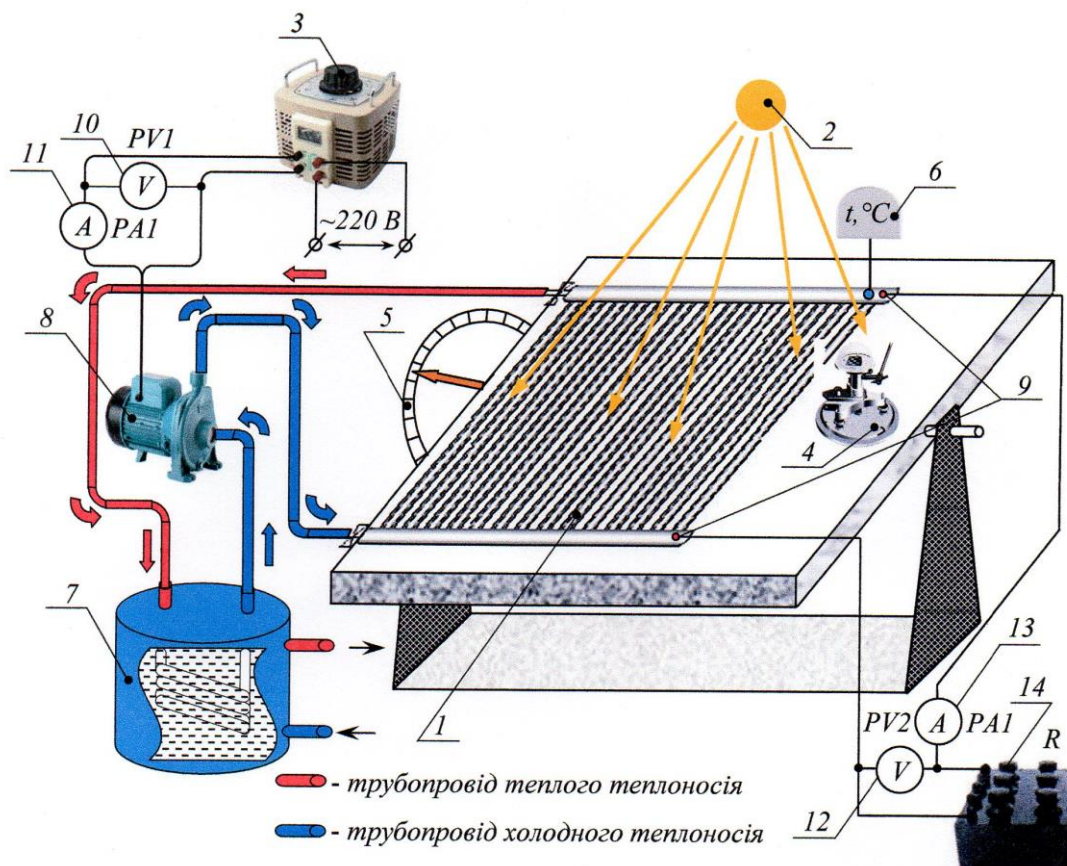
Мета роботи – дослідження електрофізичних характеристик ГСФП на основі циліндричних когенераційних (гібридних) ФЕМ, що охолоджуються, для використання на АЗС ЕМ.

Основна частина. Електрофізичні характеристики ГСФП – найважливіші параметри, оцінюючи які, можна зробити обґрунтований вибір про перспективність використання панелі для створення сонячної електростанції з необхідним значенням вихідної електричної потужності [12]. До цих параметрів відносяться: струм короткого замикання, напруга холостого ходу, ККД тощо. Для оцінювання

перелічених параметрів побудовані вольт-амперні характеристики (ВАХ) ГСФП, для дослідження яких розроблена експериментальна установка, схема якої наведена на рис. 1.

1. Опис експериментальної установки.

Оснoву експериментальної установки складає стіл з системою зміни кута нахилу дошки (5), на якій нерухомо закріплений ГСФП (1), що досліджується. Дошка (5) пофарбована білою глянцевою фарбою, для максимального відбиття сонячних променів. Розрахункова схема ГСФП на основі циліндричних когенераційних ФЕМ приведена на рис. 2. Для вимірювання інтенсивності надходження світлової енергії використовується піранометр термоелектричний М-80М (4) з гальванометром ГСА-1 (на рис. 1 непоказаний), який закріплений на поворотній дошці установки. При повороті дошки змінюється кут опромінення СФП і піранометра одночасно.

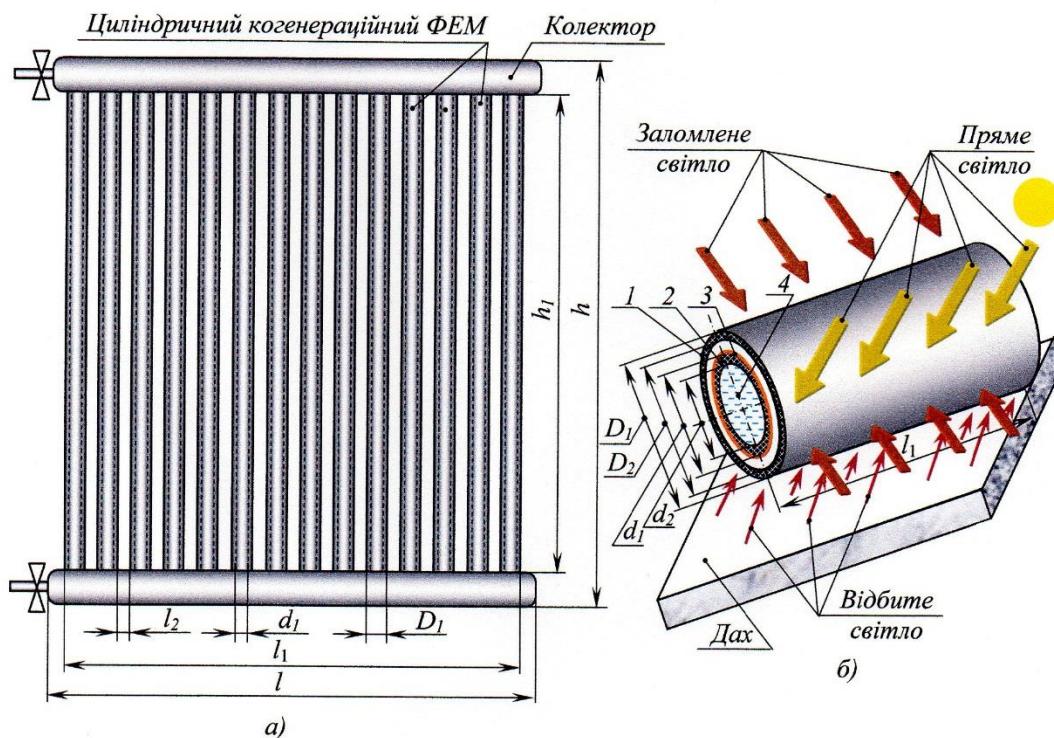


1 – СФП; 2 – Сонце; 3 – ЛАТР; 4 – піранометр; 5 – система зміни кута нахилу СФП; 6 – датчик температури; 7 – тепловий акумулятор системи охолодження; 8 – циркуляційний насос; 9 – вихідні клемі СФП; 10, 12 – вольтметри; 11, 13 – амперметри; 14 – навантаження.

Рис. 1. Схема експериментальної установки для дослідження ГСФП на основі циліндричних когенераційних ФЕМ.

Для вимірювання температури нагрівання фотоелектричного перетворювача (ФЕП) ФЕМ використовується термоперетворювач

опору (6) типу ТЭРА-ТСМ-2-8-100М-В-3-2000-МЭ(-50...180), який закріплений на поверхні ФЕП. Для дослідження характеристик ФЕП від температури його нагрівання, використовується замкнена система охолодження. Система охолодження складається з трубопроводів, циркуляційного однофазного насосу (8) типу Aquatica 775224 потужністю 1,1 кВт і подачею 220 л/хв та теплового акумулятора (7) об'ємом 200 л. Температуру ФЕП гібридного ФЕМ регулюють подачею теплоносія шляхом регулювання швидкості обертання насосу (8), яка змінюється величиною напруги, що подається на насос. Регулювання напруги живлення насосу виконується лабораторним автотрансформатором (3) змінної напруги (ЛАТР) типу TDGC2-2К з номінальною потужністю 2 кВт і номінальним струмом 8 А. В якості теплоносія системи охолодження використовується антифриз. В тепловий акумулятор подається звичайна водопровідна вода. Для регулювання навантаження ГСФП до вихідних клем (9) підключений магазин опорів Р33 (14), а вимірювання напруги живлення насосу (8) і струму, що ним споживається, а також вихідної напруги ГСФП і струму навантаження використовуються мультиметри DT830(832).



а) ГСФП; б) циліндричний когенераційний ФЕМ; 1 – зовнішня трубка; 2 – внутрішня трубка; 3 – ФЕП; 4 – теплоносій.

Рис. 2. Розрахункова схема ГСФП і поглинання сонячних променів когенераційним ФЕМ.

В ГСФП використовується 14 ФЕП, ФЕП яких з'єднані паралельно, тому сумарний струм панелі дорівнює

$$I_{СФП} = n \cdot I_{ФЕМ} = n \cdot I_{ФЕП}, \quad (1)$$

де $n = 14$ – кількість ФЕМ у ГСФП.

Будова ФЕМ і його геометричні розміри, що вказані на рис. 2, наведені у [13].

2. Дослідження щільності потужності сонячного випромінювання.

Дослідження ГСФП проводилося 8.04.2020 р. у м. Мелітополь Запорізької області в одному з приватних помешкань, який має такі географічні координати: $46^{\circ}50'$ північної широти і $35^{\circ}22'$ східної довготи. Тривалість дня – 13 год. 14 хв., схід – 6 год. 3 хв., захід – 19 год. 17 хв. Ультрафіолетовий індекс – помірний.

Для отримання максимальної потужності від ГСФП необхідно орієнтувати його площину на Сонце. Щоб поглинати найбільшу кількість сонячної енергії, площина ГСФП повинна бути завжди перпендикулярною до сонячних променів [14]. Встановлюємо експериментальну установку на горизонтальній поверхні, у місці, щоб у продовж світлої частини доби на ГСФП не падала тінь, під кутом 46° і отримуємо максимальну питому потужність сонячного випромінювання, вимірюючи її кожні 2 години. Результати експерименту приведені на рис. 3,а.

Розподіл щільності потужності p , Вт/м², сонячного випромінювання від часу роботи t , с, у продовж світлого часу доби τ , с, підпорядковується синусоїдальному закону, і її можна визначити за виразом [15]

$$p(t) = p_{max} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right). \quad (2)$$

Максимальна щільності потужності p_{max} дорівнює 825 Вт/м² о 13⁰⁰ год. (рис. 3,а). На рис. 3,а приведена розрахункова залежність, що отримана за виразом (2). Бачимо незначну похибку експерименту і розрахунку, тому вираз (2) можна використовувати для розрахунку.

Далі при максимальній щільності потужності p_{max} (13⁰⁰ год.), досліджена залежність щільності потужності сонячного випромінювання p від кута нахилу ГСФП β (рис. 3,б). Як бачимо, максимальна щільність потужності p_{max} буде при $\beta = 46^{\circ}$. Тому для отримання максимальної потужності від ГСФП, її потрібно встановлювати під кутом рівним широті місцевості, де буде працювати сонячна станція.

2. ВАХ ГСФП.

ВАХ ГСФП досліджувалися при постійній температурі ФЕП, яку підтримували 50°C , регулюванням подачі теплоносія насосом. Величину температури 50°C обґрунтовано у [13]. ВАХ ГСФП знімалися починаючи з режиму, близького до розімкненого кола

(великий опір навантаження) – режим холостого ходу. Вимірювання напруги і струму проводилося мультиметрами 12, 13 (рис. 1). Далі зменшувався опір навантаження таким чином, щоб вихідна напруга ГСФП дорівнювала 36 В і далі з дискретністю 6 В. Обов'язково визначалася точка при якій ГСФП буде мати максимальну потужність P_{max} , якій відповідає максимальний струм I_{max} і напруга U_{max} . Досліди проводилися при фіксованій максимальній щільності питомої потужності p_{max} о 7⁰⁰ год. ($p_{max} = 170 \text{ Вт/м}^2$), 9⁰⁰ год. ($p_{max} = 450 \text{ Вт/м}^2$), 11⁰⁰ год. ($p_{max} = 700 \text{ Вт/м}^2$) і 13⁰⁰ год. ($p_{max} = 825 \text{ Вт/м}^2$). Потужність $P_{ГСФП}$ визначалася за виразом:

$$P_{ГСФП} = U_{ГСФП} I_{ГСФП}. \quad (3)$$

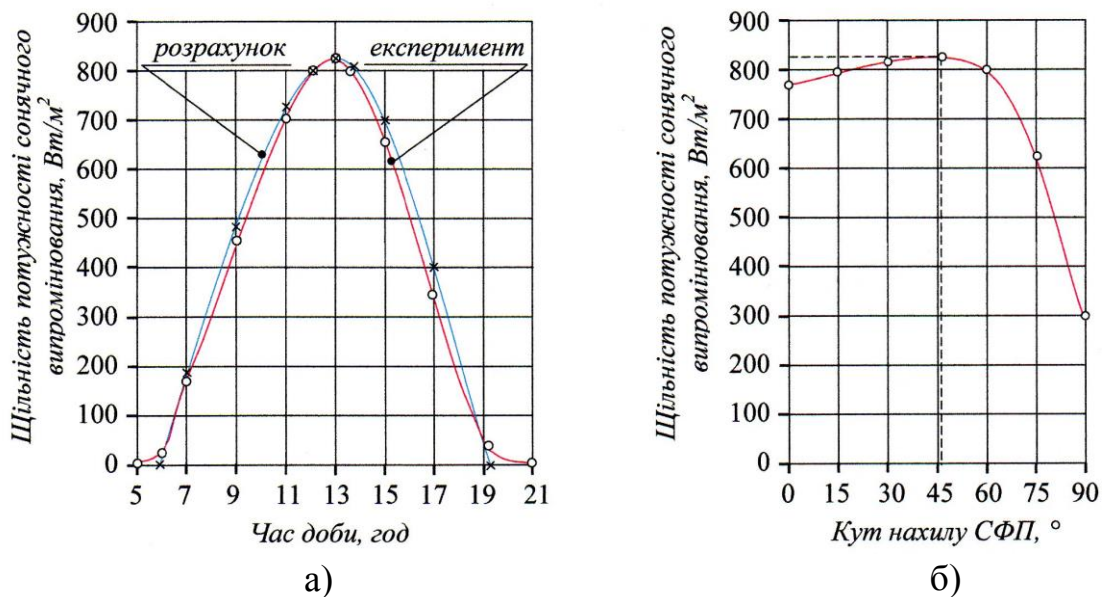


Рис. 3. Залежності щільності потужності сонячного випромінювання від часу доби (а) та кута нахилу СФП (б).

ВАХ і характеристики потужності ГСФП, отриманні експериментальним шляхом, приведені на рис. 4. Вихідна максимальна потужність P_{max} при щільності питомої потужності сонячного випромінювання 825 Вт/м^2 становить 381 Вт при вихідній напрузі $U_{max} = 34 \text{ В}$ і вихідному струмі $I_{max} = 11 \text{ А}$. Визначимо вихідну питому максимальну потужність на 1 м^2 його площі:

$$P_{ГСФП \text{ пит}} = \frac{P_{ГСФП}}{S_{ГСФП}}, \quad (4)$$

де $S_{ГСФП}$ – площа ГСФП.

Габаритні розміри розробленої ГСФП дорівнюють: $h = 1,7 \text{ м}$, $l = 1 \text{ м}$. Для виготовлення ФЕМ використані трубки з боросилікатного скла марки Т-300С з такими параметрами: зовнішня трубка – $D_1 = 50 \text{ мм}$, товщина стінки $\Delta = 2,5 \text{ мм}$, $D_2 = 45 \text{ мм}$; внутрішня трубка – $d_1 = 30 \text{ мм}$, товщина стінки $\Delta = 2,5 \text{ мм}$, $d_2 = 25 \text{ мм}$; довжина трубок $h_1 = 1500 \text{ мм}$. Таким чином, $P_{ГСФП \text{ пит}} = 381 / (1,7 \cdot 1) = 224 \text{ Вт/м}^2$.

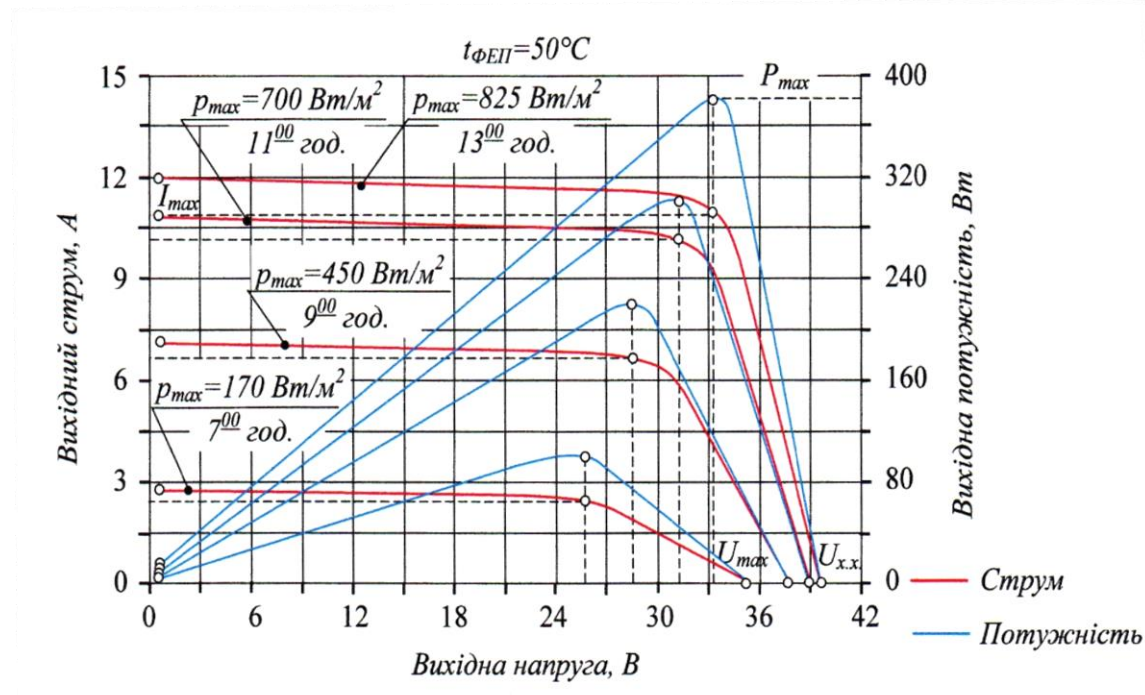


Рис. 4. ВАХ і характеристики потужності ГСФП.

Порівняємо розроблену ГСФП, яка має параметрами, що наведені вище, з сонячною панеллю JA Solar JAM60S09-325PR, що випускається компанією JA Solar і масово застосовується для побудови сонячних електростанцій у всьому світі [16]. Вона має такі технічні характеристики: $P_{max} = 325$ Вт, $U_{x.x} = 41,04$ В, $I_{к.з.} = 10,25$ А, $U_{max.} = 33,4$ В, $I_{max.} = 9,72$ А, габаритні розміри – 1657 мм \times 996 мм \times 35 мм.

Площа сонячної панелі JA Solar дорівнює $S_{СП} = 1,65$ м², тоді вихідна питома максимальна потужність її становить $P_{СП\ пит.} = 325/1,65 = 197$ Вт/м². Ефективність ГСФП, розробленої нами, у порівнянні з сонячною панеллю JA Solar JAM60S09-325PR дорівнює:

$$k_{ef} = \left(1 - \frac{P_{СП\ пит.}}{P_{ГСФП\ пит.}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{197}{224}\right) 100\% = 12,1\%$$

Висновки. Розроблено експериментальну установку для дослідження електрофізичних характеристик ГСФП на основі циліндричних когенераційних ФЕМ, яка дозволяє стабілізувати температуру ФЕП ФЕМ і підвищує достовірність отриманих характеристик панелі. Отримано дослідним і розрахунковим шляхом залежності щільності потужності сонячного випромінювання від часу доби та кута нахилу ГСФП, які мають незначну похибку, що дає можливість використовувати математичну модель (2) для розрахунку цієї залежності. Експериментально досліджені ВАХ і характеристики вихідної потужності розробленої ГСФП. Встановлено, що при максимальній щільності питомої потужності 825 Вт/м², ГСФП має вихідну максимальну потужність 381 Вт при максимальній вихідній

напрузі $U_{max} = 34$ В і вихідному струмі $I_{max} = 11$ А. Виконано порівняльний аналіз розробленої ГСФП з сонячною панеллю JA Solar JAM60S09-325PR, яка має одні з найкращих електрофізичних характеристики серед тих сонячних панелей, що випускаються за кордоном, і визначена ефективність розробленої ГСФП, котра краща на 12,1%, від відомої панелі.

Література:

1. Solar energy: Potential and future prospect / E. Kabir et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82, № 1. P. 894-900. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.094.
2. Ciriminna R., Meneguzzo F., Pecoraino M., Pagliaro M. Rethinking solar energy education on the dawn of the solar economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 63. P. 13-18. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.008.
3. Sansaniwal S., Sharma V., Mathur J. Energy and energy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82, № 1. P. 1576-1600. DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.003.
4. Chandra G., Mouli P., Bauer M. Zeman System design for a solar powered electric vehicle charging station for workplaces. *Applied Energy*. 2016. Vol. 168. P. 434-443. DOI: 10.1016/j.apenergy. 2016.01.110.
5. Rasolomampionona D., Maeght F., Cresson P-Y., Favier P. Experimental solar-based charging station for electric vehicles. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011. R. 87, NR 6. P. 58-62. URL: <http://pe.org.pl/articles/2011/6/9.pdf> (дата звернення: 10.03.2020).
6. Electric cars can now charge on sunlight day and night with Tesla Powerpacks at new “Smart Solar Charging” station. URL: <https://electrec.co/2018/06/05/electric-cars-charge-on-sunlight-tesla-powerpacks-smart-solar-charging-station/> (дата звернення: 10.02.2020).
7. Электромобиль приближает конец нефтяной эры. URL: <http://savenergy.info/page/electric-car-near-end-oil-era/> (дата звернення: 10.02.2019).
8. Галько С. В., Жарков В. Я., Жарков А. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств: монографія. Мелітополь: Люкс, 2019. 215 с.
9. Lead the charge. Drive solar. URL: <https://pairedpower.com/> (дата звернення: 20.02.2019).
10. Electric vehicle autonomous renewable charger. URL: <https://envisionsolar.com/ev-arc/> (дата звернення: 20.01.2019).
11. Галько С. В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки електромобілів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2019. Вип. 19, т. 3. С. 130-141. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-130-141.

12. Какурина Н. А., Какурин Ю. Б., Курсай Д. Е., Осипов Н. А. Исследование электрофизических характеристик солнечной панели с помощью компьютеризированного измерительного стенда. *Инженерный вестник Дона*. 2016. № 3. URL: http://idvon.ru/uploads/article/pdf/IVD_37_kakurin_kakurina.pdf_e3a16aeaf8.pdf (дата звернення: 10.02.2020).

13. Галько С. В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень: матеріали Міжнар. наук. конф.* (10 квіт. 2020 р.) Луцьк: МЦНД, 2020. Т. 1. С. 83-90. DOI: 10.36074/10.04.2020.v1.10.

14. Кашкаров А. П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. Москва: ДМК Пресс, 2011. 125 с.

15. Марахтанов М. К., Духопельников Д. В., Ивахненко С. Г., Крылов В. И. Электрогидравлический баланс солнечного теплоаккумулятора с автономным электроснабжением. *Наука и образование*. 2014. ФС77-48211. С. 332-342. DOI: 10.7463/0214.0697540.

16. Солнечная панель JA Solar JAM60S09-325PR. URL: <http://goingsolar.com.ua> (дата звернення: 20.03.2020).

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ НА ОСНОВІ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ ФОТОМОДУЛІВ

Галько С. В., Самойчук К. О.

Анотація

У статті виконаний аналіз відомих закордонних автономних зарядних станцій на основі плоских сонячних фотоелектричних панелей для зарядки акумуляторних батарей електромобілів. Запропоновано замість традиційних панелей використовувати гібридні сонячні фотоелектричні панелі на основі циліндричних когенераційних фотоелектричних модулів. Розроблено експериментальну установку для дослідження електрофізичних характеристик гібридної сонячної панелі. Отримано вольт-амперні характеристики і характеристики потужності панелі, що розробляється. Виконано порівняльний аналіз розробленої панелі з закордонним аналогом традиційної конструкції і визначена її енергетична ефективність, яка краща на 12,1% від аналогу.

Ключові слова: сонячна панель, зарядка акумуляторів, електромобіль, гібридна сонячна панель, когенераційний фотоелектричний модуль.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ НА ОСНОВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ФОТОМОДУЛЕЙ

Галько С. В., Самойчук К. О.

Аннотация

В статье выполнен анализ известных зарубежных автономных зарядных станций на основе плоских солнечных фотоэлектрических панелей для зарядки

аккумуляторных батарей электромобилей. Предложено вместо традиционных панелей использовать гибридные солнечные фотоэлектрические панели на основе цилиндрических когенерационных фотоэлектрических модулей. Разработана экспериментальная установка для исследования электрофизических характеристик гибридной солнечной панели. Получены вольт-амперные характеристики и характеристики мощности разрабатываемой панели. Выполненный сравнительный анализ разработанной панели с зарубежным аналогом традиционной конструкции и определена ее энергетическая эффективность, которая лучше на 12,1% от аналога.

Ключевые слова: солнечная панель, зарядка аккумуляторов, электромобиль, гибридная солнечная панель, когенерационный фотоэлектрический модуль.

RESEARCH OF THE HYBRID SOLAR PANEL BASED ON CYLINDRICAL COGENERATING PHOTOMODULES

S. Halko, K. Samoichuk

Summary

The analysis of the well-known foreign autonomous charging stations, where the use of renewable energy sources based on flat solar photovoltaic panels for charging of electric vehicle batteries is applied, was made in the article. This industry is considered to be one of the most important and promising areas for the development of solar energy in order to save non-renewable energy sources. The refore, instead of traditional flat panels, it was proposed to use hybrid solar photovoltaic panels based on cylindrical cogeneration photovoltaic modules, which make it possible to receive electrical and thermal energy simultaneously, and thereby increase the overall efficiency of the panel. An experimental assembly with stabilization of the temperature of a photoelectric converter has been developed to research the electrical and physical characteristics of a hybrid solar photovoltaic panel. The volt-ampere characteristics and power characteristics of the developed panel were obtained at a temperature of the photoelectric converter of 50 ° C. It was estimated that this coolant temperature is sufficient to provide hot water for administrative buildings of autonomous charging stations. Moreover, it was found that at a maximum density of specific power of solar radiation of 825 W / m², the developed hybrid solar photovoltaic panel has a maximum power of 381 W with a maximum output voltage of 34 V and an output current of 11 A, and an output specific maximum power of 224 W / m². Finally, a comparative analysis of the developed hybrid photovoltaic panel with a foreign analogue of a traditional design was carried out. As a result, it was determined that the energy efficiency of the developed photovoltaic panel was by 12.1% better than the energy efficiency of the analogue.

Key words: solar panel, battery charging, electric vehicle, hybrid solar panel, cogeneration photoelectric module.