



УДК 620.92

DOI: 10.31388/2220-8674-2020-1-27

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ НА ОСНОВІ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ ФОТОМОДУЛІВ

Галько С.В., к.т.н.

ORCID: 0000-0001-7991-0311

*Таврійський державний агротехнологічний університет**імені Дмитра Моторного*

e-mail: galkosv@gmail.com

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 (СФС) 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.

Використання сонячної енергії, можливості створення великомасштабних виробництв для цієї перспективної галузі вимагає вирішення багатьох фундаментальних наукових проблем і прикладних задач. Підвищення ефективності СФС, є актуальною задачею, рішення якої дозволить покращити техніко-економічні характеристики сонячного енергетичного обладнання, оптимізувати його енергетичні характеристики і режими роботи з врахуванням навантаження і енергії сонячного випромінювання [5,6]. Ефективність використання сонячної енергії значно залежить від того, наскільки точно при проектних розробках були враховані закономірності зміни сонячної радіації у місці передбачуваної експлуатації СФС [7,8].

Відомо, що при збільшенні питомої потужності сонячного випромінювання, збільшується нагрівання поверхні фотоелектричного



перетворювача (ФЕП) фотоелектричної панелі, що приводить до зниження її коефіцієнта корисної дії (ККД). У літній сонячний день температура ФЕП може досягати 70-80 °С [9,10]. Це протиріччя може бути вирішено шляхом відводу теплоти від ФЕП, що приведе до отримання додаткової теплової енергії, яку можна спрямувати на технологічні потреби. Аналіз експлуатації традиційних сонячних панелей показав, що на практиці це поки не використовується, так як недостатньо досліджені не тільки пристрої відводу теплоти від ФЕП, але і відсутні науково-обґрунтовані залежності ККД ФЕП від температури і характеристик сонячного опромінення.

Аналіз останніх досліджень. У роботах [7,10] досліджено вплив температури на енергетичні характеристики традиційних плоских сонячних панелей, що не охолоджуються, у різних умовах експлуатації, а також використані найбільш розповсюджені і надійні моделі, які дозволяють визначити температуру поверхні сонячної панелі в залежності від температури оточуючого середовища. Методика дослідження електрофізичних і енергетичних характеристик сонячної панелі приведена у [13].

Мета роботи – дослідження впливу температури ФЕП циліндричного когенераційного (гібридного) ФЕМ на енергетичні показники гібридної сонячної фотоелектричної панелі (ГСФП), що охолоджується.

Основна частина. Для підвищення ККД СФС, нами запропоновано замість плоских сонячних панелей використовувати гібридні панелі на основі когенераційних фотоелектричних модулів (ФЕМ) циліндричної форми, що охолоджуються рідиною. Це відкриває можливість створення гібридних сонячних фотоелектричних панелей (ГСФП) для одночасного отримання електричної і теплової енергії [11]. Розрахункова схема ГСФП і поглинання сонячних променів когенераційним ФЕМ циліндричної форми приведена на рис. 1.

Геометрична площа ГСФП визначається рівнянням

$$S_{ГСФП} = h \cdot l, \quad (1)$$

де h – висота ГСФП, м;

l – ширина ГСФП, м;

Габаритні розміри ГСФП становлять: $h = 1,7$ м, $l = 1$ м. Тому

$$S_{ГСФП} = 1,7 \cdot 1 = 1,7 \text{ м}^2.$$

Для виготовлення ФЕМ використані трубки з боросилікатного скла марки Т-300С з такими параметрами: зовнішня трубка – $D_1 = 50$ мм, товщина стінки $\Delta = 2,5$ мм, $D_2 = 45$ мм; внутрішня трубка – $d_1 = 30$ мм, товщина стінки $\Delta = 2,5$ мм, $d_2 = 25$ мм; довжина трубок $h_1 = 1500$ мм. Кількість ФЕМ у ГСФП - 14 [12].

Товщина ФЕП ФЕМ складає 5-6 мкм, тому з достатньою ступеню точності, його діаметр можна прийняти рівним зовнішньому діаметру внутрішньої трубки ФЕМ, тобто $d_{ФЕП} = d_1 = 30$ мм.

Ефективна площа ГСФП, яка приймає участь у перетворенні сонячного опромінювання, через параметри ФЕП дорівнює

$$S_{ГСФП\text{еф}} = n \cdot S_{ФЕП} = n \cdot \pi \cdot h_1 \cdot d_1, \quad (2)$$

де h_1 – висота трубки, м;

d_1 – діаметр внутрішньої трубки, м;

n – кількість ФЕМ у ГСФП.

Таким чином, ефективна площа ГСФП буде дорівнювати

$$S_{ГСФП\text{еф}} = 14 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 30^{-3} = 1,978\text{м}^2.$$

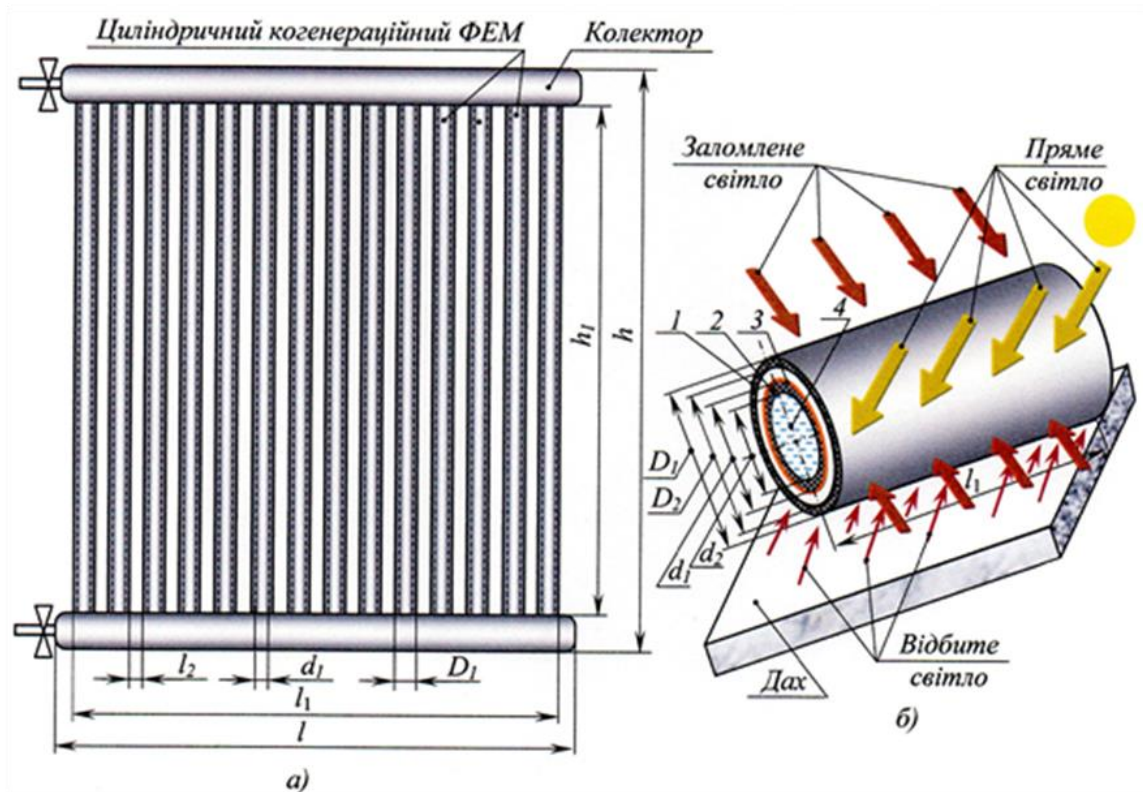


Рис. 1. Розрахункова схема ГСФП і поглинання сонячних променів когенераційним ФЕМ:

а) ГСФП; б) циліндричний когенераційний ФЕМ

1 – зовнішня трубка; 2 – внутрішня трубка; 3 – ФЕП; 4 – теплоносій

З наведених розрахунків видно, що ефективна площа ГСФП, яка перетворює сонячне опромінювання в електроенергію більше від геометричної площі ГСФП у 1,16 разів, що приведе до збільшення генерування потужності P , Вт, ГСФП, а відповідно і його загального ККД. Тому панель, яка виготовлена на основі циліндричних ФЕМ з параметрами, що наведені вище, у порівнянні з традиційною сонячною плоскою панеллю, буде мати потужність, що генерується, і ККД вищу в 1,16 раз. Для отримання максимального ККД ГСФП, вона



встановлена на поверхні, яка пофарбована білою глянцевою фарбою, що має коефіцієнт відбиття близько 0,95-0,97.

Дослідження впливу температури ФЕП циліндричного когенераційного (гібридного) ФЕМ на енергетичні показники ГСФП, що охолоджується, виконувалися на експериментальній установці опис якої приведений у [12]. Основу експериментальної установки складає стіл з системою зміни кута нахилу поверхні, на якій нерухомо закріплений ГСФП, що досліджується. Для вимірювання інтенсивності надходження світлової енергії використовується піранометр термоелектричний М-80М з гальванометром ГСА-1, який закріплений на поворотній поверхні установки. При повороті дошки змінюється кут опромінювання ГСФП і піранометра одночасно. Для вимірювання температури нагрівання ФЕП використовується термоперетворювач опору типу ТЭРА-ТСМ-2-8-100М-В-3-2000-МЭ(-50...180), який закріплений на його поверхні.

З метою дослідження характеристик ФЕП від температури його нагрівання, використовується замкнена система охолодження. Система охолодження складається з трубопроводів, циркуляційного однофазного насосу типу Aquatica 775224 та теплового акумулятора. Температуру ФЕП регулюють подачею теплоносія шляхом регулювання швидкості обертання насоса, яка змінюється величиною напруги, що подається на насос. Регулювання напруги живлення насоса виконується лабораторним автотрансформатором (ЛАТР) змінної напруги типу TDGC2-2К. В якості теплоносія системи охолодження використовується антифриз. В тепловий акумулятор подається звичайна водопровідна вода. Для регулювання навантаження ГСФП, до її вихідних клем підключений магазин опорів Р33. Для вимірювання напруги живлення насоса і струму, що ним споживається, а також вихідної напруги ГСФП і струму навантаження, використовуються мультиметри DT830(832).

Дослідження ГСФП проводилося 8.04.2020 р. у м. Мелітополь Запорізької області в одному з приватних помешкань. Географічні координати м. Мелітополь - 46°50' північної широти і 35°22' східної довготи, тому ГСФП встановлювався під кутом 46°. Досліди проводилися при фіксованій щільності питомої потужності сонячного опромінювання p о 7⁰⁰ год. ($p = 170 \text{ Вт/м}^2$), 9⁰⁰ год. ($p = 450 \text{ Вт/м}^2$), 11⁰⁰ год. ($p = 700 \text{ Вт/м}^2$) і 13⁰⁰ год. ($p = 825 \text{ Вт/м}^2$). Максимальна добова щільність питомої потужності спостерігалася о 13⁰⁰ год. і дорівнювала 825 Вт/м². Максимальна потужність $P_{\text{ГСФП max}}$ при фіксованій щільності питомої потужності p визначалася за виразом:

$$P_{\text{ГСФП max}} = U_{\text{ГСФП max}} I_{\text{ГСФП max}} \cdot \quad (3)$$

Вольт-амперні характеристики, які отримані при температурі ФЕП (теплоносія) 50°C, приведені у [11]. Температура ФЕП змінювалася від



20°C до 80°C з інтервалом 10°C. ККД ГСФП при різних температурах ФЕП (теплоносія) дорівнює:

$$\eta_{ГСФП} = \frac{P_{\max ГСФП}}{p} 100\% . \quad (4)$$

Результати дослідження і розрахунків енергетичних показників від температури ФЕП наведені у таблиці 1 та на рис. 2-4.

Таблиця 1

Результати дослідження та розрахунків енергетичних показників ГСФП від температури ФЕП

Температура ФЕП, °C	20	30	40	50	60	70	80
Показники							
Питома потужність сонячного опромінювання, p , Вт/м ²	825						
Питома максимальна потужність, що генерує ГСФП, $p_{\max ГСФП}$, Вт/м ²	228,9	227,8	227,4	224,4	219,1	210,5	197,3
ККД ГСФП, $\eta_{ГСФП}$, %	27,75	27,61	27,56	27,2	26,56	25,51	23,92
Максимальна потужність, що генерує ГСФП, $P_{ГСФП \max}$, Вт	389,1	387,3	386,6	381	372,5	358,0	335,4
Питома потужність сонячного опромінювання, p , Вт/м ²	700						
Питома максимальна потужність, що генерує ГСФП, $p_{\max ГСФП}$, Вт/м ²	202,2	201,1	200,7	198,1	193,5	185,9	174,2
ККД ГСФП, $\eta_{ГСФП}$, %	28,88	28,73	28,67	28,3	27,64	26,55	24,89
Максимальна потужність, що генерує ГСФП, $P_{ГСФП \max}$, Вт	343,7	341,9	341,2	336,7	329,0	316,0	296,2
Питома потужність сонячного опромінювання, p , Вт/м ²	450						
Питома максимальна потужність, що генерує ГСФП, $p_{\max ГСФП}$, Вт/м ²	136,4	135,7	135,4	133,6	130,5	125,4	117,5
ККД ГСФП, $\eta_{ГСФП}$, %	30,31	30,15	30,09	29,7	29,0	27,86	26,12
Максимальна потужність, що генерує ГСФП, $P_{ГСФП \max}$, Вт	231,9	230,7	230,2	227,2	221,9	213,2	199,8
Питома потужність сонячного опромінювання, p , Вт/м ²	170						
Питома максимальна потужність, що генерує ГСФП, $p_{\max ГСФП}$, Вт/м ²	57,1	56,8	56,7	55,9	54,6	52,5	49,2
ККД ГСФП, $\eta_{ГСФП}$, %	33,57	33,4	33,33	32,9	32,13	30,86	28,94
Максимальна потужність, що генерує ГСФП, $P_{ГСФП \max}$, Вт	97,1	96,6	96,4	95	92,8	89,3	83,6

Максимальна потужність $P_{ГСФП \max}$, при заданій питомій потужності сонячного опромінювання, визначалася шляхом

регулювання опору навантаження ГСФП, таким чином щоб добуток $U_{ГСФПmax} \cdot I_{ГСФПmax}$ був максимальний.

Аналізуючи рис. 2 видно, що при нагріві ФЕП від 20°C до 80°C, ККД ГСФП і потужність, що вона генерує, знижуються на 12-14%. При температурі ФЕП від 20°C до 50°C, ці показники зменшуються повільніше (до 5%), а при температурі ФЕП від 50°C до 80°C зниження прискорюється (від 5% до 12-14%). Тому, можна зробити висновок, що для створення систем гарячого водопостачання на основі ГСФП, температура теплоносія, що охолоджує ФЕП, не повинна перевищувати 50°C, що цілком достатньо для цих цілей.

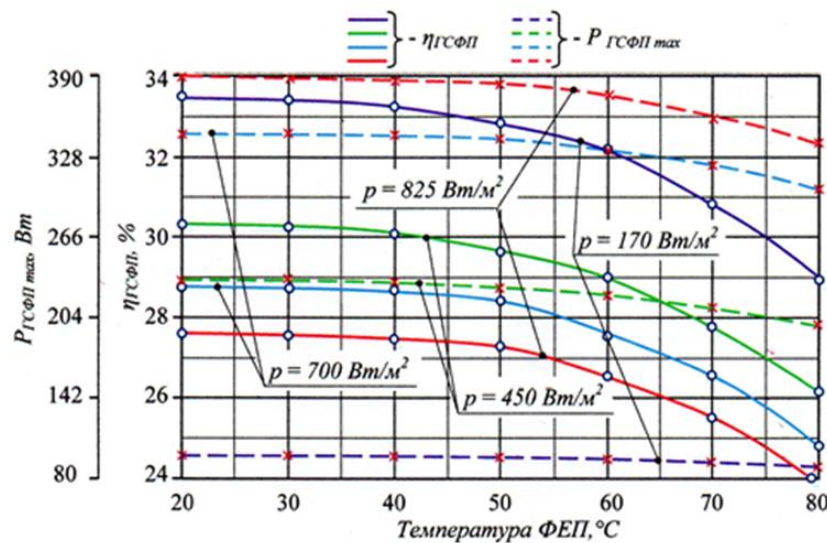


Рис. 2. Залежності ККД і максимальної потужності, що генерує ГСФП, від температури ФЕП при фіксованих значеннях питомої потужності сонячного опромінювання

Аналіз рис. 3 і 4 показує, що при збільшенні питомої потужності сонячного опромінювання p у 5 разів, максимальні струм, напруга і потужність, що генеруються ГСФП, зростають не пропорційно, а відповідно у 3 рази, 1,3 раз і 4 рази, але ККД панелі ($\eta_{ГСФП}$) знижується майже у 1,2 рази. Тобто, питома потужність сонячного опромінювання значно впливає на електрофізичні і енергетичні характеристики сонячної панелі, а особливо на максимальні струм і потужність, і повільніше - на максимальну напругу і ККД.

ККД традиційних (плоских) сонячних панелей від температури її поверхні визначається відомим виразом [7]:

$$\eta_{pi} = \eta_0 (1 - k_t (T_{pi} - T_0)), \quad (5)$$

де η_0 – ККД сонячної панелі при початковій температурі, %;

T_0 – початкова температура панелі при якій визначено η_0 , °C;

T_{pi} – температура сонячної панелі при якій визначається η_{pi} , °C;

k_t – температурний коефіцієнт ФЕП сонячної панелі, в.о.

Для традиційних сонячних панелей k_t приймається рівним 0,0045, що дає достатню точність розрахунків η_{pi} при температурі сонячної панелі T_{pi} [7].

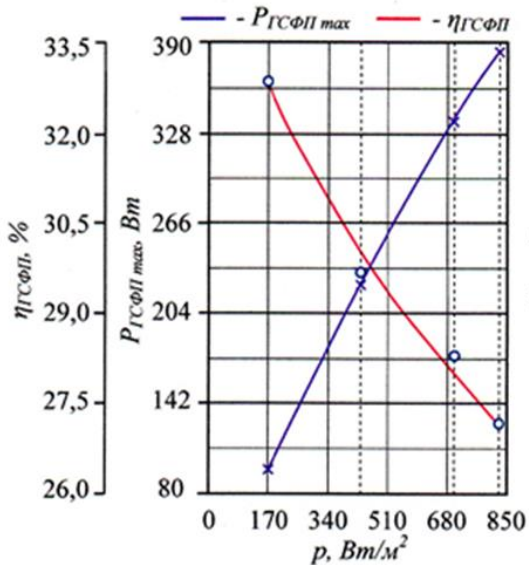


Рис. 3. Залежності ККД і максимальної потужності, що генерує ГСФП, від питомої потужності сонячного опромінювання при температурі ФЕП 50°C

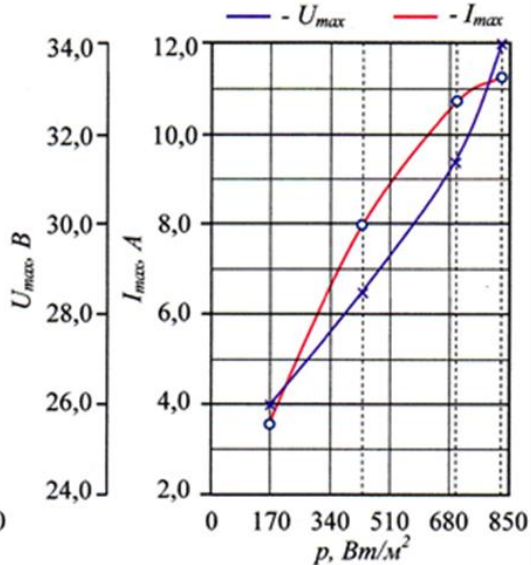


Рис. 4. Залежності максимальної напруги і струму ГСФП від питомої потужності сонячного опромінювання при температурі ФЕП 50°C

Але в нашому випадку вираз (5) дає значну похибку, так як ГСФП складається з циліндричних ФЕМ і у перетворенні сонячного випромінювання приймає участь пряме, заломлене і відбите світло (рис. 1). Тому для виконання розрахунків за виразом (5) нами отримана залежність температурного коефіцієнту (k_{tu}) циліндричного ФЕП від його температури, яка приведена на рис. 5.

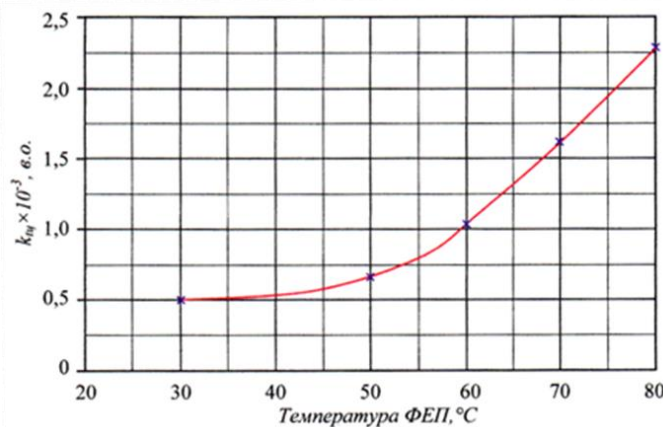


Рис. 5. Залежності температурного коефіцієнту ФЕП (k_{tu})

Висновки. У статті досліджено енергетичні показники ГСФП для одночасного отримання електричної і теплової енергії, яка виготовлена



з циліндричних когенераційних ФЕМ, що охолоджуються рідиною. За результатами досліджень можна зробити такі висновки: При нагріві ФЕП від 20°C до 80°, ККД ГСФП і потужність, що вона генерує, знижуються на 12-14%, але при температурах ФЕП від 20°C до 50°, ці показники зменшуються повільніше (до 5%), а при температурах ФЕП від 50°C до 80° зниження прискорюється (від 5% до 12-14%), тому для створення систем гарячого водопостачання на основі ГСФП та отримання високого електричного ККД панелі, температура теплоносія, що охолоджує ФЕП, не повинна перевищувати 50°C, що цілком достатньо для цих цілей. Для визначення ККД ГСФП розрахунковим шляхом в залежності від температури ФЕП отримана залежність температурного коефіцієнту циліндричного ФЕП від його температури, що дозволяє з високою точністю виконувати розрахунки.

Список використаних джерел.

1. Kabir E., Kumar P., Kumar S., Adelodun A. A., Ki-Hyun Kim. Solar energy: Potential and future prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82, № 1. P. 894-900. DOI: <https://doi.org/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: <https://doi.org/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: <https://doi.org/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: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.110>.

5. Twidell J., Weir T. Renewable Energy Resources. London and New York: Taylor & Francis, 2006. 601 p.

6. Ефимов В. П. Фотопреобразователи энергии солнечного излучения нового поколения. *Физика и техника полупроводников*. 2010. Т. 8. №2. - С. 100-115.

7. Джумаев А. Я. Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции. *Технические науки – от теории к практике: материалы XLVI Междунар. науч.-практ. конф., 27 травня 2015 р.* Новосибирск: СибАК, 2015. № 5 (42). URL: <http://sibac.info> (дата звернення: 01.04.2020).

8. Rasolomampionona D., Maeght F., Cresson P-Y., Favier P. Experimental solar-based charging station for electric vehicles. *Przeegląd*



Elektrotechniczny. 2011. R. 87, NR 6. P. 58-62. URL: <http://pe.org.pl/articles/2011/6/9.pdf> (дата звернення: 10.03.2020).

9. 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: <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>.

10. Ёе Вин, Виссарионов В. И. Исследование влияния температуры на характеристики фотоэлектрических преобразователей. *Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях*. Москва: ВВЦ, 2012. С. 486-488.

11. Галько С. В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки електромобілів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 19. Т. 3. С. 130-141. DOI: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>.

12. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. *Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica*, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia, 2020. Vol. 2. P. 39-44. DOI: <https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.10>.

13. 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://ivdon.ru/ru/magazine/search> (дата звернення 05.04.2020)

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ НА ОСНОВІ ЦИЛІНДРИЧНИХ КОГЕНЕРАЦІЙНИХ ФОТОМОДУЛІВ

Галько С.В.

Анотація

У статті досліджено вплив температури фотоелектричного перетворювача на енергетичні показники гібридної сонячної фотоелектричної панелі на основі циліндричних когенераційних фотоелектричних модулів, що охолоджуються рідиною. Отримано залежності ККД і максимальної потужності, що генерує фотоелектрична панель, від температури фотоелектричного перетворювача та питомої потужності сонячного опромінювання. Для визначення ККД панелі розрахунковим шляхом, отримана залежність температурного коефіцієнту циліндричного фотоелектричного перетворювача від його температури, що дозволяє з високою точністю виконувати розрахунки.

Ключові слова: сонячна енергія, сонячна панель, когенераційний фотомодуль, фотоелектричний перетворювач, ККД, температура, потужність.



ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГИБРИДНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ НА ОСНОВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ФОТОМОДУЛЕЙ

Галько С.В.

Аннотация

В статье исследовано влияние температуры фотоэлектрического преобразователя на энергетические показатели гибридной солнечной фотоэлектрической панели на основе цилиндрических когенерационных фотоэлектрических модулей, которые охлаждаются жидкостью. Получены зависимости КПД и максимальной мощности, которую генерирует фотоэлектрическая панель, от температуры фотоэлектрического преобразователя и удельной мощности солнечного излучения. Для определения КПД панели расчетным путем, получена зависимость температурного коэффициента цилиндрического фотоэлектрического преобразователя от температуры, позволяющая с высокой точностью выполнять расчеты.

Ключевые слова: солнечная энергия, солнечная панель, когенерационный фотомодуль, фотоэлектрический преобразователь, КПД, температура, мощность.

EFFECT OF TEMPERATURE ON ENERGY INDICATORS OF A HYBRID SOLAR PANEL BASED ON CYLINDRICAL COGENERATION PHOTO MODULES

Halko S.

Summary

To increase the efficiency of solar photovoltaic stations, it is proposed to use hybrid panels based on cylindrical cogeneration photovoltaic modules, which are cooled by a liquid, instead of flat solar panels. This opens up the possibility of creating hybrid solar photovoltaic panels for the simultaneous production of electrical and thermal energy.

The article examines the effect of the temperature of the photoelectric converter on the energy indicators of a hybrid solar photovoltaic panel based on cylindrical cogeneration photovoltaic modules, which are cooled by a liquid. The dependences of the efficiency of the maximum power, which the photovoltaic panel generates, the maximum voltage, the maximum current on the temperature of the photoelectric converter and the specific power of solar radiation are obtained. It was found that with an increase in the specific power of solar radiation by a factor of 5, the maximum current, voltage and power generated by the panel increase not proportionally, and accordingly by 3 times, 1.3 times and 4 times, but the efficiency of the panel decreases by 1.2 times.

To determine the efficiency of the panel by calculation, the temperature dependence of the temperature coefficient of a cylindrical photoelectric converter is obtained, which allows calculations with high accuracy. It was found that when the photoelectric converter is heated from 20°C to 80°C, the efficiency and generated power of the panel are reduced by 12-14%, but at converter temperatures from 20°C to 50°C, these indicators decrease slightly (up to 5%), and at converter temperatures from 50°C to 80°C, the decrease is accelerated (from 5% to 12-14%), therefore, to build hot water systems for household consumers based on hybrid solar photovoltaic panels and to obtain high electrical efficiency, it is recommended that the temperature of the coolant that cools the converter is not more than 50°C, which is sufficient for these purposes.

Key words: solar energy, solar panel, cogeneration photo module, photoelectric converter, efficiency, temperature, power.