

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОГЕНЕРАЦІЙНОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ГІБРИДНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Галько Сергій Віталійович

ORCID ID: 0000-0001-7991-0311

канд. техн. наук, доцент, керівник

Навчально-наукового інституту загальноуніверситетської підготовки

Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного, Україна

Вступ. З метою економії енергоресурсів, деякий науковий інтерес викликає окремий спосіб зарядки акумуляторних батарей (АБ) електрокара від сонячних електричних станцій (СЕС), які розташовані на даху адміністративних будівель автозаправних станцій (АЗС) [1,2].

Переорієнтація на електромобілі – глобальний тренд. Країни Європи, Китай і Індія заявили, що відмовляться від продажу машин з двигунами внутрішнього згорання через 10-25 років, да і самі автовиробники почали орієнтуватися на виробництво гібридів і електромобілів. Плани переходу на електричні приводи оголосили BMW, Daimler і Volkswagen Group та інші. Світові продажі електричних і гібридних автомобілів з кожним роком збільшуються мінімум удвічі. Найбільше електромобілів в Китаї. На другому місці – Європа, особливо скандинавські країни. До кінця поточного року очікується, що кількість електромобілів перетне позначку в 5 млн. До 2035 року кожний четвертий автомобіль в Україні буде електричним, прогнозує центр Разумкова [3].

В Україні на 1.01.2019 р. нараховувалося 1179 станцій підзарядки електромобілів. Особливо активно мережа електрозаправок розвивається в Чернігівській, Полтавській і Харківській областях. Наявність електрозаправок уже чітко простежується вздовж головних автомагістралей: траси Київ-Полтава-Харків, Київ-Одеса, Харків-Дніпро-Запоріжжя-Мелітополь-Азовське море. Інфраструктуру зарядних станцій в Україні складають як станції, спеціалізовані тільки на підзарядці електрокарів, відомих АЗС, так і позамережеві зарядки біля ресторанів, готелів та ін. закладів [3]. Водночас можна зазначити, що в Україні відчувається гостра нестача швидких зарядних станцій - їх в десять разів менше, ніж звичайних [1].

В роботі [4] обґрунтована можливість створення локальних енергетичних мереж для зарядки АБ електромобілів на існуючих стаціонарних АЗС на основі відновлюваних джерел, з метою енергозбереження енергії, що отримана традиційним шляхом. Для підвищення загального коефіцієнта корисної дії (ККД) СЕС, замість плоских сонячних батарей, запропоновано використовувати СЕС з когенераційними фотоелектричними модулями (ФЕМ) циліндричної форми, що охолоджуються рідиною. Це відкриває можливість створення гібридних СЕС для одночасного отримання електричної і теплової енергії.

Мета роботи – математичний опис і експериментальне дослідження циліндричного фотоелектричного перетворювача (ФЕП) когенераційного (гібридного) ФЕМ для локальних енергетичних мереж зарядки АБ на АЗС.

Основні матеріали дослідження. Схема роботи локальної електричної мережі на основі СЕС з циліндричними когенераційними ФЕМ для зарядки АБ електромобілів і отримання теплової енергії для використання у системах гарячого водопостачання приведена на рис. 1. СЕС з циліндричним когенераційним ФЕМ об'єднує у своєму складі циліндричний ФЕП, для отримання електроенергії, і колектор, для отримання теплової енергії [4].

Добова енергія ΣW_{CEC} , що повинна виробляється СЕС, яка виготовлена на основі циліндричних когенераційних модулів для одночасного генерування електричної і теплової енергії, і потрібна для забезпечення роботи локальної електричної мережі для зарядки АБ електромобілів і забезпечення гарячого водопостачання, визначається рівнянням:

$$\Sigma W_{CEC} = W_{CEC} + Q_B, \quad (1)$$

де:

W_{CEC} – сумарна добова електроенергія, що виробляється СЕС, кВт·год;

Q_B – сумарна добова тепла енергія, що виробляється СЕС, кВт·год.

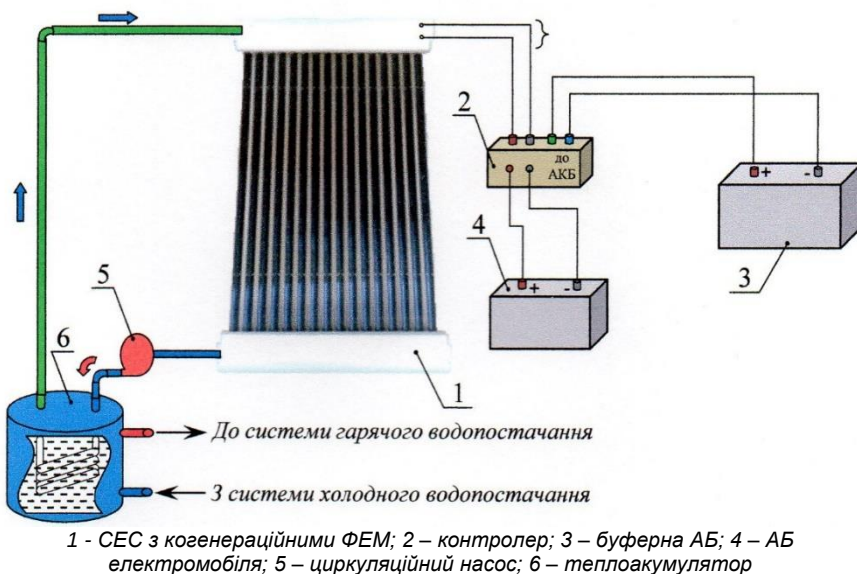


Рис. 1. Схема роботи локальної електричної мережі на основі СЕС з циліндричними когенераційними ФЕМ для зарядки АБ електромобілів і гарячого водопостачання

Сумарна добова електроенергія, що виробляється СЕС, W_{CEC} , витрачається на зарядку буферної АБ, яка в ранкові і вечірні часи, коли інтенсивність сонячного випромінювання недостатня, забезпечує роботу локальної мережі. Величина W_{CEC} повинна перевищувати необхідну електроенергію для зарядки буферної АБ на коефіцієнт запасу k_{3CEC} , тобто

$$W_{CEC} = k_{CEC} W_{AB}, \quad (2)$$

де:

W_{AB} – електроенергія, що необхідна для зарядки буферної АБ, кВт·год.

Електроенергія для зарядки буферної АБ визначається як

$$W_{AB} = \frac{k_{зАБ}}{\eta_{зАБ}} \left(\frac{W_{АБ\text{ ЕМ}}}{\eta_{зАБ\text{ ЕМ}}} + W_{НАС} \right), \quad (3)$$

де:

$W_{АБ\text{ ЕМ}}$ – електроенергія, що необхідна для зарядки АБ електромобіля, кВт·год;

$W_{НАС}$ – електроенергія, що споживається насосом, кВт·год;

$\eta_{зАБ}$ – ККД зарядки буферної АБ, в.о.;

$\eta_{зАБ\text{ ЕМ}}$ – ККД зарядки АБ електромобіля, в.о.;

$k_{зАБ}$ – коефіцієнт запасу енергії буферної АБ, в.о.

У найпростішому випадку, при повністю розрядженій АБ електромобіля, потрібна енергія для її зарядки дорівнює

$$W_{АБ\text{ ЕМ}} = U_{АБ\text{ ЕМ}} \cdot C_{АБ\text{ ЕМ}}, \quad (4)$$

де:

$U_{АБ\text{ ЕМ}}$ – напруга АБ електромобіля, В;

$C_{АБ\text{ ЕМ}}$ – ємність АБ електромобіля, А·год.

Для більш точного визначення $W_{АБ\text{ ЕМ}}$ відомий вираз [5]

$$W_{АБ\text{ ЕМ}} = U_{АБ\text{ ЕМ}} \int_{C_0}^{C_{\max}} C_{АБ\text{ ЕМ}} \cdot \psi(C) \cdot dC, \quad (5)$$

де:

$\psi(C)$ – функція, що враховує випадковий характер та частоту настання процесу зарядки АБ електромобіля.

Електроенергія, що споживається насосом, для забезпечення циркуляції теплоносія у замкненому контурі тепловий колектор – теплоаккумулятор визначається рівнянням

$$W_{НАС} = t P_{СП} = \rho g t \frac{GH}{\eta_{НАС}}, \quad (6)$$

де:

ρ – щільність теплоносія, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

t – час роботи насосу, с;

G – витрати теплоносія через колектор, м³;

H – необхідний напір теплоносія, м.

$\eta_{НАС}$ – ККД насоса, в.о.

Таким чином, математична модель потрібної сумарної добової електроенергії, що виробляється СЕС, буде мати вигляд

$$W_{CEC} = k_{CEC} \frac{k_{зAB}}{\eta_{зAB}} \left(\frac{U_{ABEM} \int_{C_0}^{C_{\max}} C_{ABEM} \cdot \psi(C) \cdot dC}{\eta_{зABEM}} + \rho g t \frac{GH}{\eta_{НАС}} \right) \quad (7)$$

Для визначення параметрів СЕС з метою визначення виробництва сумарної добової електроенергії W_{CEC} необхідно визначити кількість когенераційних ФЕМ та їх параметри (діаметр трубок та їх довжини).

Сумарна добова електроенергія, що виробляється одним ФЕМ $W_{ФЕМ}$ дорівнює сумарній добовій електроенергії, яка виробляється ФЕП, який нанесений на внутрішню трубку ФЕМ [4] і визначається рівнянням [6]

$$W_{ФЕМ} = W_{ФЕП} = S_{ФЕП} \eta_{ФЕП} \int_0^{\tau} q_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) \cdot dt = \frac{2\tau}{\pi} q_{\max} S_{ФЕП} \eta_{ФЕП}, \quad (8)$$

де:

$S_{ФЕП}$ – площа поверхні циліндричного ФЕП, m^2 ;

$\eta_{ФЕП}$ – ККД ФЕП, в.о.;

$q_{\max}$ – добова пікова питомо щільність потужності сонячного випромінювання, $Вт/m^2$;

τ – тривалість світлої частини доби, год;

t – тривалість доби, год.

Як відомо, ККД ФЕП суттєво залежить від їхньої температури. Для виготовлення ФЕП циліндричної форми нами використаний гетерофотоперетворювач (ГФП) на основі арсеніду галію (GaAs) зі структурою AlGaAs-GaAs тонкоплівковий, та як він має більш високий ККД, у порівнянні з кремнієвим. Ширина забороненої зони у них практично співпадає з оптимальною шириною забороненої зони для напівпровідникових перетворювачів сонячної енергії рівної 1,4 еВ. У кремнієвих цей показник дорівнює 1.1 еВ. Товщина ГФП складає 5-6 мкм для отримання ККД біля 20%, тоді як у кремнієвих 20-30 мкм.

При нагріві ФЕП на один градус зверх $25^{\circ}C$ він втрачає в напрузі 0,002 В, тобто $0,4\%/^{\circ}C$. У яскравий сонячний день елементи ФЕП нагріваються до $70...80^{\circ}C$ втрачаючи 0,07...0,09 В кожен. Це і є основною причиною зниження ККД. За проведеними дослідженнями ФЕП на основі GaAs типу HIT (heterojunction with intrinsic thin layer) - побудована залежність $\eta_{ФЕП}$ від його температури (рис. 2).

Як видно з рис. 2, що підвищення температури ФЕП з $25^{\circ}C$ до $80^{\circ}C$, знижує $\eta_{ФЕП} (25^{\circ}C)$ з 19,8% до $\eta_{ФЕП} (80^{\circ}C) = 17,3\%$, тобто на 12,6%. Тому для покращення роботи ФЕП і збільшення його ККД, запропоновано використовувати контур охолодження. Температура теплоносія, який циркулює в замкнутому контурі тепловий колектор – теплоаккумулятор, підтримується $50^{\circ}C$, що цілком достатньо для системи гарячого водопостачання. При температурі ФЕП $50^{\circ}C$ $\eta_{ФЕП} (50^{\circ}C)$ дорівнює 19,5%, тобто його ККД знижується всього на 1,5%.

Сумарна добова електроенергія, що виробляється СЕС, дорівнює

$$W_{CEC} = n \cdot W_{ФЕМ} = n \cdot W_{ФЕП}, \quad (9)$$

де:

n – кількість ФЕМ у СЕС.

Підставивши у рівняння (9) вираз (8), знайдемо площу поверхні циліндричного ФЕП $S_{ФЕП}$ при його температурі 50°C

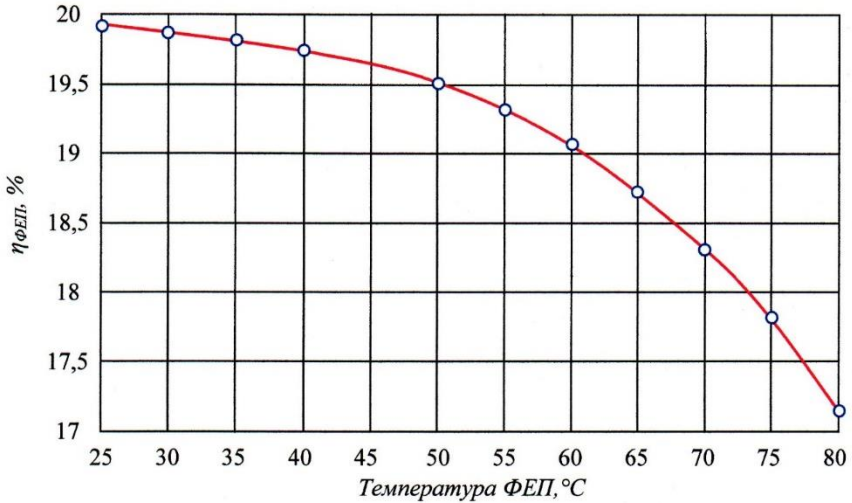


Рис. 2. Залежності ККД ФЕП від температури

$$S_{ФЕП} = \frac{W_{CEC}}{n \cdot \eta_{ФЕП(50^\circ\text{C})} \int_0^\tau q_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) \cdot dt}. \quad (10)$$

Для більш точного визначення площі поверхні циліндричного ФЕП, необхідно враховувати коефіцієнт пропускання $k_{пр}$ світлової хвилі, який дорівнює відношенню потоку випромінювання Φ , який пройшов через середу (скло), до потоку випромінювання Φ_0 , який потрапив на його поверхню зовні.

Підставимо рівняння (7) у вираз (10), отримаємо математичну модель площі поверхні циліндричного ФЕП у функції параметрів АБ електромобіля і насоса, для перекачування теплоносія, з врахуванням пікової денної питомої щільності потужності сонячного випромінювання:

$$S_{ФЕП} = \frac{k_{зСЕС} \frac{k_{зАБ}}{\eta_{зАБ}} \left(\frac{U_{АБЕМ} \int_{C_0}^{C_{\max}} C_{АБЕМ} \cdot \psi(C) \cdot dC}{\eta_{зАБЕМ}} + \rho g t \frac{GH}{\eta_{НАС}} \right)}{n \cdot k_{np} \cdot \eta_{ФЕП(50^\circ C)} \int_0^{\tau} q_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) \cdot dt} \quad (11)$$

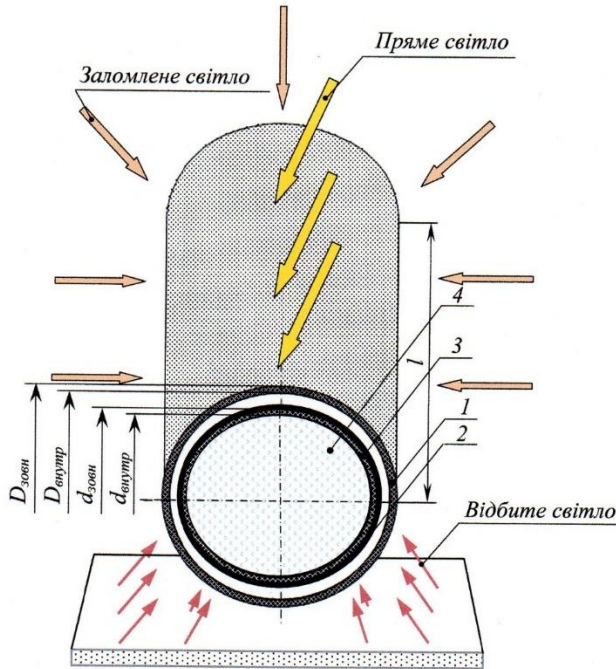
Оскільки циліндричні ФЕМ мають поверхню 360° , то вони перетворюють більше сонячного світла (прямого, заломленого і відбитого) в електричну енергію. В ідеалі поверхня даху, на якій встановлений ФЕМ, повинна бути білою, щоб краще відбивати сонячне світло. Час генерації електроенергії у класичних плоских сонячних батареї обмежений сектором проходження Сонця, так як світло падає під визначеним кутом до їх поверхні. У порівнянні з ними циліндричні ФЕМ можуть захоплювати світло у продовж більш тривалого часу. Поверхня у 360° також виключає необхідність використання сонячних трекерів. Зазори між окремими модулями дають можливість повітрю проходити крізь панелі. Це гарантує стабільність при сильному вітрі (до 210 км/год). У свою чергу вітер, проходячи крізь зазори, відчищає ФЕМ, що підвищує ефективність і продуктивність. Із-за своєї конструкції, сніг провалюється крізь панелі, при цьому він під панеллю відбиває сонячне світло зворотно на панель, і ККД модуля підвищується. Поглинання сонячних променів ФЕМ наведено на рис. 3.

Трубки ФЕМ виконані з міцного боросилікатного скла, яке забезпечує пропуск хвиль сонячного світла в діапазоні 0,4...2,7 мкм. Боросилікатне скло більш стійке до хімічного впливу оточуючого середовища і в наслідок меншого коефіцієнту термічного розширення менш чутливе до різкої зміни температури. Для виготовлення ФЕМ використані трубки з боросилікатного скла марки Т-300С з такими параметрами: зовнішня трубка – $D_{зовн} = 50$ мм, товщина стінки $\Delta = 2,5$ мм, $D_{внутр} = 45$ мм; внутрішня трубка – $d_{зовн} = 30$ мм, товщина стінки $\Delta = 2,5$ мм, $d_{внутр} = 25$ мм; довжина трубок $l = 1500$ мм.

Так як товщина ФЕП складає 5-6 мкм, то нею можна знехтувати, і зовнішній діаметр внутрішньої трубки $d_{зовн}$ можна прийняти рівним діаметру ФЕП $d_{ФЕП}$. Таким чином, площа поверхні циліндричного ФЕП через його параметри дорівнює

$$S_{ФЕП} = \pi \cdot l \cdot d_{ФЕП} = \pi \cdot l \cdot d_{зовн} \quad (12)$$

Для розрахунку зовнішнього діаметру внутрішньої трубки $d_{зовн}$, оберемо трубку стандартної довжини $l_{ст}$, тоді



1 – зовнішня трубка; 2 – ФЕМ; 3 – внутрішня трубка; 4 – теплоносій
Рис. 3. Поглинання сонячних променів циліндричним когенераційним ФЕМ

$$d_{\text{зовн}} = \frac{S_{\text{ФЕМ}}}{\pi \cdot l_{\text{ст}}} = \frac{k_{\text{зсес}} \frac{k_{\text{заб}}}{\eta_{\text{заб}}} \left(\frac{U_{\text{аб ем}} \int_{C_0}^{C_{\text{max}}} C_{\text{аб ем}} \cdot \psi(C) \cdot dC}{\eta_{\text{заб ем}}} + \rho g t \frac{GH}{\eta_{\text{нас}}} \right)}{n \cdot k_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{ФЕМ}}(50^\circ \text{C}) \int_0^{\tau} q_{\text{max}} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) \cdot dt} \cdot \pi \cdot l_{\text{ст}}, \quad (13)$$

Розрахувавши $d_{\text{зовн}}$, обираємо стандартний найбільший діаметр внутрішньої трубки $d_{\text{ст}}$ ($d_{\text{ст}} \geq d_{\text{зовн}}$).

Теплова енергія $Q_B(t)$, яку виробить тепловий колектор, для нагрівання теплоносія об'ємом V_B в системі тепловий колектор – теплоаккумулятор до температури $T_B(t)$ у продовж проміжку часу t визначається як

$$Q_B(t) = c_p \cdot \rho \cdot V_B (T_B(t) - T_{B0}), \quad (14)$$

де:

c_p – питома масова теплоємність теплоносія, Дж/кг·К;

ρ – щільність теплоносія, кг/м³;

$T_{Б0}$ – початкова температура теплоносія, °С.

Таким чином, математична модель добової енергії ΣW_{CEC} , що виробляється СЕС на основі циліндричних когенераційних модулів для зарядки АБ електромобілів і гарячого водопостачання, буде дорівнювати

$$\Sigma W_{CEC} = k_{CEC} \frac{k_{зАБ}}{\eta_{зАБ}} \left(\frac{U_{АБ\text{ ЕМ}} \int_{C_0}^{C_{\max}} C_{АБ\text{ ЕМ}} \cdot \psi(C) \cdot dC}{\eta_{зАБ\text{ ЕМ}}} + \rho g t \frac{GH}{\eta_{НАС}} \right) + c_p \cdot \rho \cdot V_B (T_B(t) - T_{Б0}) \quad (15)$$

Висновки.

1. Отримано математичну модель площі поверхні циліндричного ФЕП у функції параметрів АБ і насосу для перекачування теплоносія, з врахуванням пікової денної питомої щільності потужності сонячного випромінювання, для розробки СЕС на основі гідридних ФЕМ, з метою побудови локальних електричних мереж на АЗС.

2. Експериментально досліджений циліндричний тонкоплівковий ФЕП (товщина 5-6 мкм) на основі GaAs типу HIT зі структурою AlGaAs-GaAs і побудована залежність ККД від температури, на основі якої встановлено, що при нагріванні ФЕП з 25°C до 80°C, його ККД знижується на 12,6%.

3. Запропоновано охолодження ФЕП здійснювати теплоносієм з температурою 50°C, що цілком достатньо для системи гарячого водопостачання. Це приведе до зниження ККД ФЕП всього на 1,5%, але до збільшення майже на 10% його ККД у порівнянні з традиційними модулями, що не охолоджуються, які нагріваються в літній день до 80-90 °С.

Список використаних джерел:

1. Аккумуляторные батареи для электромобилей. (2019). Вилучено із <https://ecotechnica.com.ua/stati/1718>.
2. Галько, С. В., Жарков, В. Я. & Жарков, А. В. (2019). *Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств*. Мелітополь: Люкс. ISBN 978-617-7218-62-2.
3. Електромобиль приближает конец нефтяной эры. (2019). Вилучено із <http://savenenergy.info/page/electric-car-near-end-oil-era/>
4. Галько, С. В. (2019). Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки електромобілів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 19(3), 130-141.
5. Будько, В. І. (2017) Розроблення математичної моделі роботи автономної зарядної станції електромобілів від вітроелектричних установок. *Відновлювана енергетика*, (3), 6-13.
6. Марахтанов, М. К., Духопельников, Д. В., Ивахненко, С. Г. & Крылов, В. И. (2014) Электрогидравлический баланс солнечного теплоаккумулятора с автономным электроснабжением. *Наука и образование*, (ФС77-48211), 332-342.