

# МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЗАРЯДЖАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

**В.Р. Кузьминський, студент, О.Ю. Гаєвський, д.ф.-м.н., проф.**  
*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії*

**Вступ.** Енергія сонця може виступати як основне джерело електричної енергії для фотоелектричних станцій, так і бути додатковим джерелом підключеним до мережі з можливістю передачі електроенергії в мережу. Застосування фотоенергетики для заряджання електромобілів (ЕМ) почало набирати популярності в останні роки і зарядні станції можна зустріти в багатьох країнах, а саме в США, Канаді, Іспанії та інших. Інфраструктура фотоелектричних зарядних станцій (ФЕЗС) в Україні лише розвивається і напряму залежить від поширення використання електромобілів. Щоб зменшити цю залежність на етапі початку розповсюдження ЕМ, доцільно використовувати енергію від фотогенерації на ФЕЗС для передачі в електромережу. Як показує аналіз навантаження на зарядні станції з боку ЕМ [1] потреба у заряджанні мінімальна у денні години (від 11 до 15 год.), коли фотогенерація максимальна. В такі години енергія від фотоелектричних модулів (ФМ) використовується для заряджання буферних акумуляторних батарей (АБ) або подається в мережу, тобто слугує додатковим джерелом доходів для ФЕЗС. Тому перспективним напрямом є створення мережевих фотоелектричних станцій, які призначені для заряджання ЕМ і для видачі надлишкової потужності в енергосистему.

**Мета роботи.** Визначення та моделювання режимів роботи мережевої фотоелектричної зарядної станції та особливостей роботи її основних компонентів: масиву фотоелектричних модулів, DC-DC конверторів, інвертору і буферної акумуляторної батареї.

**Матеріали досліджень і результати розробки.** Типова ФЕЗС, показана на рисунку 1, має в якості основних компонентів масив ФМ, буферні АБ, DC-DC конвертор з функцією MPPT (Maximum Power Point Tracking – режим відстежування точки максимальної потужності), двоспрямований зарядний пристрій постійного струму (Bi-directional DC Charger) і двоспрямований інвертор, підключений до мережі. Конвертор постійного струму MPPT реалізований, як правило, за схемою підвищуюче-понижуючого перетворювача, який забезпечує отримання максимальної потужності від масиву ФМ. Енергія від DC-DC конвертору передається на шину постійного струму. К шині підключений двоспрямований зарядний пристрій для контролю напруги та струму на АБ електромобіля. Він також має можливість зворотного потоку потужності – від АБ в DC шину.

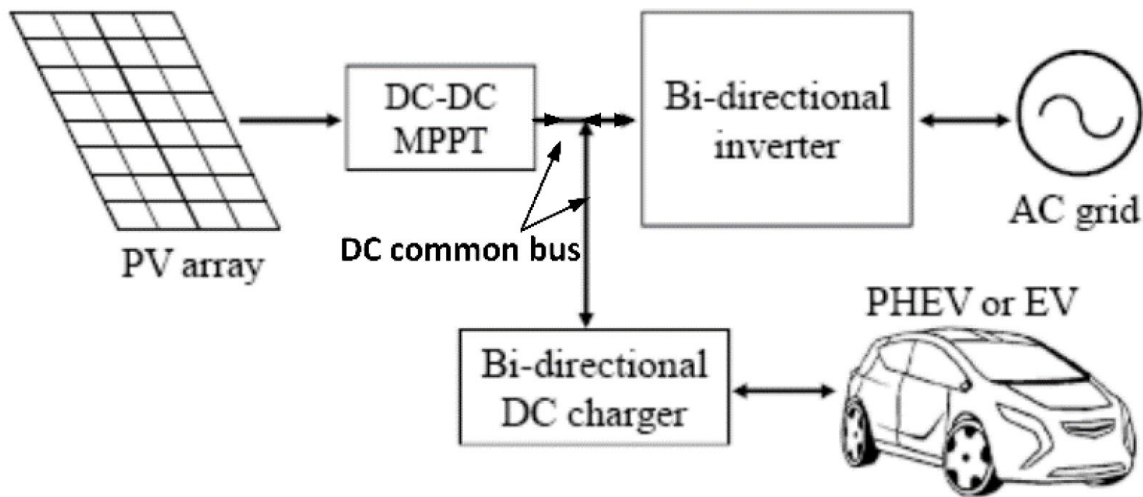


Рисунок 1 – Спрощена схема фотоелектричної зарядної станції з підключенням до електричної мережі [2]

Електрична енергія генерується в ФМ і, якщо в даний момент часу на станції перебуває ЕМ, то ця енергія спрямовується на його зарядку. Коли транспортний засіб буде заряджений, енергія буде спрямована в буферну батарею, яка забезпечує заряд ЕМ та компенсує різкі зміни потужності фотогенерації. У випадку, коли ЕМ і буфер будуть заряджені, енергія перенаправляється до мережі для продажу за зеленим тарифом. Потужність зарядної станції визначається добовою енергією, яку можна видати в акумулятори ЕМ, і сумарної потужністю фотомодулів. Розрахунок ФЕЗС виконується з умови мінімізації використання мережевої енергії. Однією з особливостей цієї станції є можливість для користувача обирати час заряджання ЕМ в залежності від обраного режиму заряджання ЕМ і тарифу по якому буде заряджатись користувач. Розглянемо роботу основних компонентів ФЕЗС з інсталяційною потужністю масиву фотомодулів 100 кВт, яка розташована в околиці Києва.

*Фотоелектричні модулі.* Вважаємо, що ряди ФМ мають орієнтацію на південь і кут нахилу  $\beta = 30^\circ$ . Погодинні значення інтенсивності сонячної радіації ( $\text{кВт}/\text{м}^2$ ), усередненні для декілька років, наведені на рисунку 2 для кожного місяця.

*Буферна акумуляторна батарея.* Буферна АБ призначена для зберігання надлишку згенерованої енергії та видачі енергії електромобілям, коли фотогенерація недостатня. Завдяки наявності цього компоненту зарядної станції є можливість обирати час зарядки автомобіля, що дозволяє, з одного боку, змінювати швидкість заряджання і обирати прийнятний для клієнта тариф, а, з іншого боку, віддавати перевагу в заряджанні електромобілів в ті години, коли тариф вище. Стан заряду буферної АБ описується відносною ємністю

$$S_{bat}(t) = \frac{C_{bat}(t)}{C_{bat,n}} \equiv \frac{SOC_{bat}(t)}{100}, \quad (1)$$

де  $C_{bat}(t)$  – ємність буферу в момент  $t$ ,  $C_{bat}n$  – загальна ємність буферу,  $SOC(t)$  (State Of Charge) – стан заряду у відсотках. Номінальна ємність буферної АБ 1000 А·год.

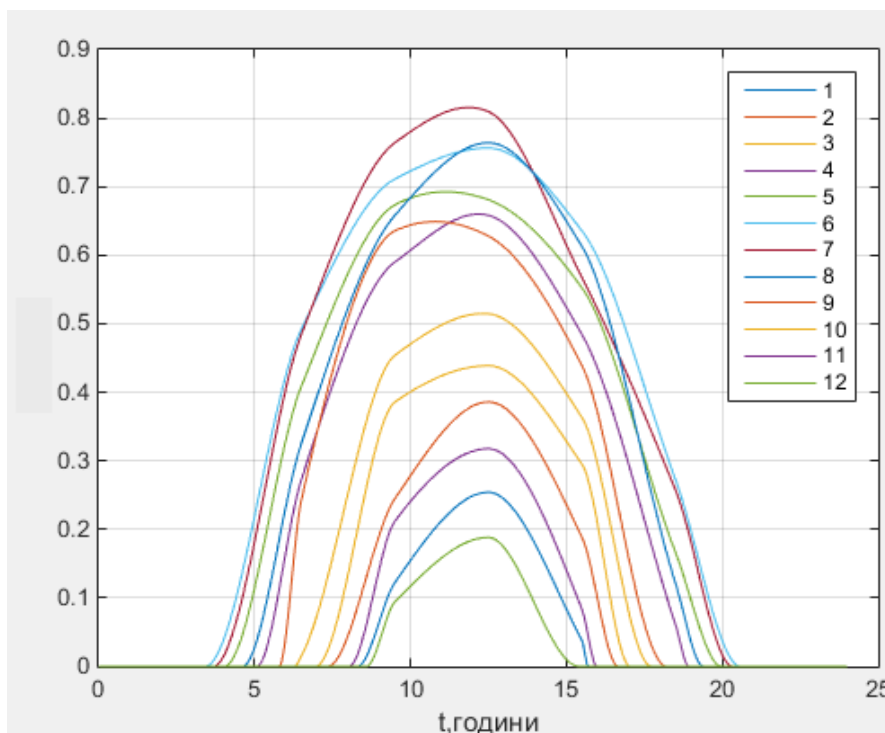


Рисунок 2 – Усереднена інтенсивність сонячної радіації (вісь ординат, кВт/м<sup>2</sup>) по годинах світлового дня (вісь абсцис) в різні місяці року (від 1 до 12-го) для міста Київ

Зміна поточного стану заряду на проміжку часу від  $t_1$  до  $t_2$  визначається через струм  $I_{bat}$  в батарею (із батареї) як:

$$\Delta S_{bat}(t_1, t_2) \equiv S_{bat}(t_2) - S_{bat}(t_1) = \begin{cases} \frac{\eta_{bat, ch}}{C_{bat, n}} \int_{t_1}^{t_2} I_{bat}(t) dt, \text{ заряд} \\ - \frac{1}{\eta_{bat, dis} C_{bat, n}} \int_{t_1}^{t_2} I_{bat}(t) dt, \text{ розряд} \end{cases} \quad (2)$$

де  $\eta_{bat, ch}$ ,  $\eta_{bat, dis}$  – ККД процесів зарядки і розрядки батареї.

**DC шина.** Основною функцією шини є транспортування енергії від ФМ або з мережі до буферної батареї або акумулятора ЕМ. Потужність  $P_{gen}$  яка йде від ФМ через DC-DC перетворювач в DC шину, дорівнює:

$$P_{gen}(t) = \eta_{conv} P_{PV}(t) \quad (3)$$

де  $P_{PV}(t)$  – поточна потужність масиву модулів,  $\eta_{conv}$  – ККД підвищуюче-понижуючого конвертор. Сумарна потужність, яка поступає з загальної шини в двоспрямовані DC-DC перетворювачі, до яких підключені зарядні термінали в певний час  $t$ , дорівнює :

$$P_{DC-DC, EV}(t) = \eta_{bi} \sum_{i \in t} P_{EV, i}(t), \quad (4)$$

а потужність обміну шини з системою зберігання енергії (Energy Storage System, ESS), тобто буферним АБ, дорівнює:

$$P_{ESS}(t) = \eta_{bi} P_{bat}(t), \quad (5)$$

де  $\eta_{bt}$  – ККД DC-DC перетворювача.

Двоспрямовані DC-DC перетворювач і AC-DC перетворювач (інвертор-випрямляч). DC-DC перетворювач працює в двох режимах, зарядки і розрядки, в залежності від співвідношення поточної напруги на вході і заданої напруги на виході. Цей пристрій може виконувати функції як підвищуючого так і понижуючого перетворювача.

Задачею AC-DC перетворювача є перетворення енергії, яка йде з мережі на шину, та навпаки, з шини в мережу. ККД AC-DC перетворювача визначено як  $\eta_{ci}$ .

Акумуляторна батарея ЕМ. Стан заряду АБ електромобілів змінюється з часом в процесі заряджання і описується функцією  $S_{EV,i}(t)$  ( $i$  – індекс електромобіля), яка визначається аналогічно  $S_{bat}(t)$  (1). Збільшення заряду на всіх акумуляторах ЕМ, які мали початковий стан  $S_{EVr,i}$ , до моменту  $t$  дорівнює

$$\Delta S_{EV}(t) = \frac{\Delta C_{EV}(t)}{C_{EVn}} = \frac{1}{100 C_{EVn}} \sum_i (SOC_{EVr,i} - SOC_{EV,i}(t)) \cdot C_{EVn,i} \quad (6)$$

Вважаємо, що літій-іонні АБ електромобілів заряджаються за одним режимом “Constant Current – Constant Voltage” (CC-CV) [3] і мають однакову номінальну енергію 60 кВт·год.

Результати моделювання. Моделювання та розрахунок режимів ФЕЗС було виконано в пакеті MATLAB за отриманими в роботі рівняннями. На рисунку 3 показана типова крива поведінки напруги, зарядного струму і стану АБ електромобіля, який знаходиться на зарядці.

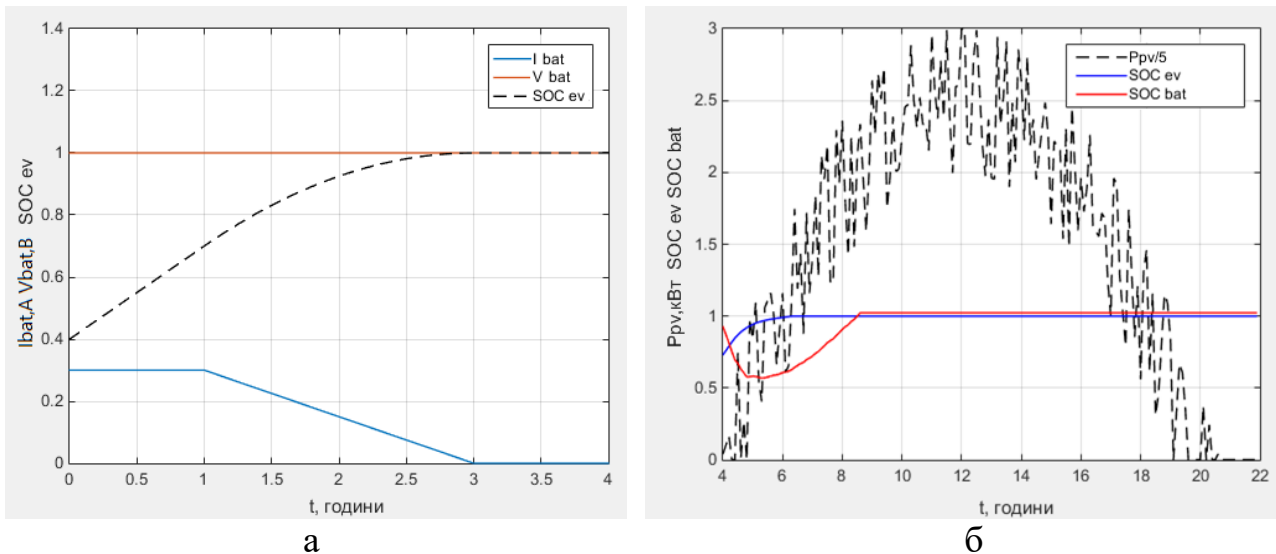
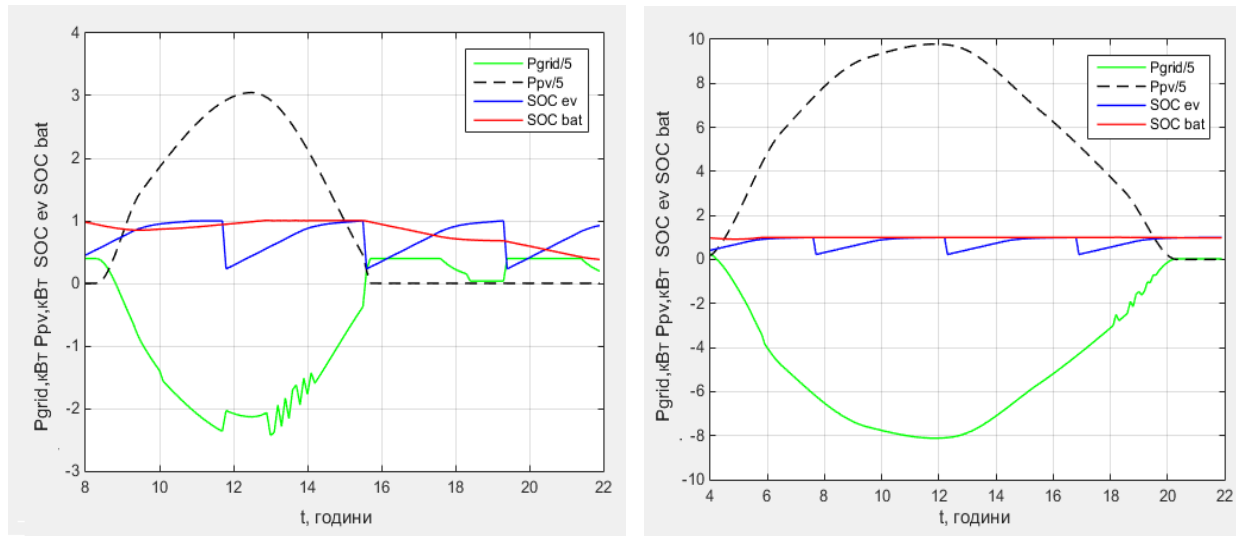


Рисунок 3 – Модельні зарядні криві та криві стану акумулятора ЕМ (а); приклад кривих станів буферного та ЕМ-акумуляторів на фоні флуктуацій сонячної радіації підчас заряджання ЕМ (б).

На рисунку 4 зображено процес поступового заряду чотирьох ЕМ в зимній та літній періоди, один за одним. Бачимо, що на початку дня енергії генерації та буферної батареї не достатньо для того щоб заряджати ЕМ з потрібною швидкістю, тому використовується енергія з мережі (потужність  $P_{grid} > 0$ ), потім коли фотогенерація достатня для ЕМ, видається енергія в мережу ( $P_{grid} < 0$ ). Да-

лі йде змінна черговість розряду та заряду буферної батареї. Різкий спад лінії заряду ЕМ відповідає моментам, коли приєднується до терміналу наступне авто з розрядженим АБ.



а б  
Рисунок 4 – Криві поступового заряду на мережевої ФЕЗС чотирьох ЕМ взимку (а) і літом (б).

**Висновки.** Сформульована модель режимів роботи мережевої ФЕЗС і виконані в пакеті MATLAB розрахунки процесів заряджання різної кількості електромобілів в зимовий та літній сезони. Змодельовані два варіанти найбільш ймовірних режимів роботи станції в реальних умовах: режим максимальної ефективності (1) і максимального навантаження (2). Було показано, що для зимового періоду найбільш вигідним є режим максимальної ефективності, а для літнього періоду – режим максимального навантаження. Також було проаналізовано доходи, які отримує станція за надання електроенергії в мережу або в ЕМ.

#### Перелік посилань

1. V. Kumar, V. Ravi Teja, M. Singh and S. Mishra. PV Based Off-Grid Charging Station for Electric Vehicle // IFAC PapersOnLine. –2019. –vol.52, N4. –p.276–281.
2. A.R. Bhatti, Z. Salam. A rule-based energy management scheme for uninterrupted electric vehicles charging at constant price using photovoltaic-grid system // Renewable Energy. 2018. – vol.125. – p.384-400.
3. A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng et all. Lithium-ion battery fast charging: A review // eTransportation. - 2019. – vol. 1, 100011. –27 p.