

УДК 621.345

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.53.117>

## ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ АВТОНОМНИХ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ТА БУФЕРНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ

**В.Б. Павлов**<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, **В.І. Бudyко**<sup>2\*\*</sup>, канд. техн. наук, **В.М. Кириленко**<sup>2\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, **М.О. Бudyко**<sup>2\*\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, **К.В. Кириленко**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [mobil99@ukr.net](mailto:mobil99@ukr.net),

<sup>2</sup> – Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: [solar\\_budko@ukr.net](mailto:solar_budko@ukr.net)

*Запропоновано математичний опис системи автономної зарядної станції електромобілів з використанням фотоелектричних установок. Обґрунтовано необхідну енергоємність буферного акумулятора енергії в разі реалізації автономних зарядних станцій електромобілів з використанням фотоелектричних установок як генераторів електричної енергії. Розглянуто особливості забезпечення електричною енергією зарядної станції на основі реальних даних інтенсивності сонячного випромінювання. Встановлено діапазон потужностей фотоелектричної установки, за яких забезпечується заряд буферного акумулятора з урахуванням дійсних показників сонячного випромінювання. Бібл. 12, рис. 7.*

**Ключові слова:** фотоелектрична система, акумуляторна батарея, електромобіль, автономна зарядна станція.

**Вступ.** Минулого 2018 року в Україні введено в експлуатацію 646 МВт нових фотоелектричних станцій (ФЕС), що виробляють екологічно чисту електроенергію [1]. Приріст потужності ФЕС у 3,06 раза перевищив 2017 рік. За існуючих темпів нарощування встановленої потужності ФЕС вже до 2030 року їх сумарна потужність досягне 8,5 ГВт, однак паралельно з цим зростатиме потреба в збільшенні регулюючих потужностей об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України, що в свою чергу може призвести до сповільнення динаміки будівництва цих об'єктів відновлюваної енергетики.

Одним з варіантів збереження існуючих темпів приросту потужності фотоенергетики в Україні є розвиток та популяризація автономних систем електроживлення з використанням відновлюваних джерел енергії. Досить привабливим у цьому ракурсі є створення автономних зарядних станцій електромобілів (АЗСЕМ) різних типів (як повністю електричних, так і гібридів, що можуть підзаряджатись).

На сьогоднішній день існують практичні приклади реалізації таких зарядних станцій. Зокрема, в рамках проекту «Smart Solar Charging» компанії LomboXnet в Утрехті (Нідерланди) реалізована зарядна станція електромобілів. Вона оснащена 20 пунктами заряджання, підключеними до фотоелектричних установок (ФЕУ) на 200 фотомодулів і системою буферних акумуляторів Tesla Powerpack потужністю 400 кВт та енергоємністю 800 кВт\*год [2]. Компанія Piped Power (США) реалізує проекти зарядних станцій електромобілів з використанням ФЕУ номінальною потужністю 16,8 кВт та максимальним зарядним струмом до 40 А [3]. Така розробка є актуальною для електромобілів (ЕМ) з невеликою енергоємністю АБ ( $E_{AB}^{EM} \approx 15-17$  кВт\*год). За більших значень енергоємності АБ ЕМ зростатиме час заряджання транспортного засобу, що не завжди є зручним. Компанія Envision Solar's (США) запатентувала та реалізує власну розробку мобільної (пересувної) зарядної станції електромобілів, що використовує ФЕУ та буферний акумулятор енергії [4].

© В.Б. Павлов, В.І. Бudyко, В.М. Кириленко, М.О. Бudyко, К.В. Кириленко, 2019

ORCID ID: \*<http://orcid.org/0000-0003-0565-265X>; \*\*<http://orcid.org/0000-0002-6219-4221>;  
\*\*\*<http://orcid.org/0000-0002-6168-2469>; \*\*\*\*<http://orcid.org/0000-0003-0928-1657>;  
\*\*\*\*\* <http://orcid.org/0000-0003-0353-8685>

На відміну від існуючих аналогів ця розробка може легко переміщатись на нове місце, де є необхідність у зарядженні електричного транспортного засобу, однак потужність такої станції не перевищує 3 кВт, що в свою чергу свідчить про тривалий режим заряджання.

Над проблематикою створення АЗСЕМ з використанням ФЕУ працюють закордонні науковці [5–6], які в своїх дослідженнях намагаються оптимізувати структуру зарядних станцій з використанням фотоелектричних установок, а також зменшити негативний вплив на роботу об'єднаної енергосистеми в разі підключення нових потужностей на основі відновлюваних джерел.

Моделювання виробництва електроенергії ФЕУ  $E_{ФЕУ}$  обумовлюється випадковим характером інтенсивності сонячного випромінювання (яке є енергетичним ресурсом), тобто нелінійним алгоритмом перетворення енергії Сонця в електричну енергію, що вносить додаткову невизначеність через особливості роботи фотоелектричних установок у різних кліматичних умовах та різних рельєфних ландшафтах.

Складність моделювання роботи автономної зарядної станції з використанням фотоелектричних установок обумовлюється випадковим характером приїзду електромобіля для зарядження його акумуляторної батареї (яка є споживачем електричної енергії), що вносить додаткову невизначеність через особливості експлуатації електричних транспортних засобів у різних режимах експлуатації.

У роботі розглядаються питання використання енергії Сонця в разі застосування фотоелектричних установок у складі АЗСЕМ. Розміщуються такі зарядні станції в Україні поблизу автобанів, автомагістралей, автомобільних доріг міжнародного та державного значення, а також у населених пунктах і містах за наявності площадки (наземної чи дахової) під встановлення фотоелектричної системи.

**Метою роботи** є математичний опис систем забезпечення електроенергією автономних зарядних станцій електромобілів з буферними акумуляторами енергії та оцінка можливості використання фотоелектричних установок в їх складі як джерела електричної енергії.

**Математичний опис роботи фотоелектричної установки.** Інтенсивність сонячного випромінювання, що визначає енергію, яка потрапляє на одиницю площі поверхні за одиницю часу, є випадковою величиною і залежить від астрономічних і метеорологічних факторів – висоти Сонця над обрієм, тривалості дня, хмарності, вологості та прозорості атмосфери.

Описання розподілу інтенсивності сонячного випромінювання проводять бета розподілом [7]. Можливим є також використання експоненціального, геометричного, логнормального та гама розподілів.

Потужність ФЕБ обмежена певною величиною, яка дорівнює номінальній (установленій) потужності  $P_{ФЕБ}$  незалежно від величини інтенсивності сонячного випромінювання. Графічний приклад типової кривої потужності наведено на рис. 1. З одного боку, аналіз сімейства ампер-вольтних характеристик показує прямо пропорційну залежність струму ФЕБ від

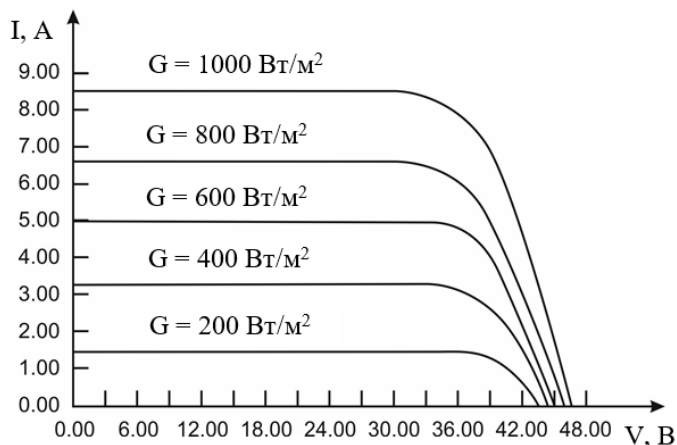


Рис. 1

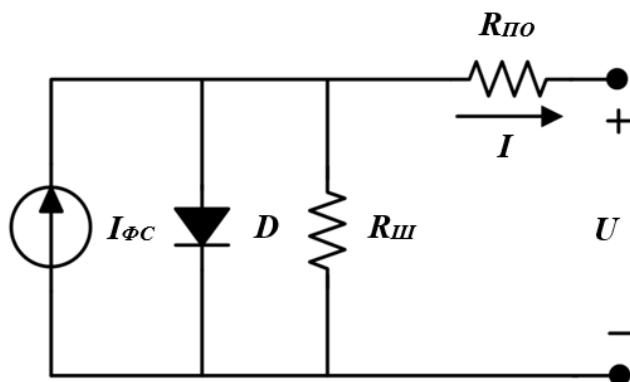


Рис. 2

інтенсивності сонячної радіації ( $G$ , Вт/м<sup>2</sup>). З іншого боку, наведені вольт-амперні характеристики відображають нелінійність залежностей  $I_{\Phi EB} = f(U)$ , які змінюються залежно від інтенсивності випромінювання і температури. Це, з рештою, визначатиме і нелінійну залежність  $P_{\Phi EB} = f(U)$ , оскільки потужність ФЕБ  $P_{\Phi EB}$  як джерела електричної енергії в найпростішому випадку виглядає як добуток:  $P_{\Phi EB} = U_{\Phi EB} \cdot I_{\Phi EB}$ .

Аналіз літературних джерел [8, 9], де вивчалось питання моделювання роботи ФЕБ, показав, що найбільш поширеною та простою в реалізації вважається однодіодна схема заміщення фотоелементів (рис. 2). Еквівалентна схема моделі фотоелемента складається з джерела фотоструму ( $I_{\Phi C}$ ), діода ( $D$ ), резистора ( $R_{III}$ ), встановленого паралельно до джерела струму, і резистора ( $R_{II O}$ ), що описує внутрішній опір комірки, а залежність  $I_{\Phi EB} = f(U)$  описується таким рівнянням:

$$I_{\Phi EB} = I_{\Phi C} - I_D \left( \exp \left[ \frac{q(U + I R_{II})}{k \cdot T \cdot A} \right] - 1 \right) - \frac{U + I R_{II}}{R_{\Phi}}, \quad (1)$$

де  $I_{\Phi C}$  – фотострум, А;  $I_D$  – зворотній струм насичення діода, А;  $R_{III}$  – шунтуючий опір, Ом;  $R_{II O}$  – послідовний опір, Ом;  $q$  – заряд електрона,  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $k$  – стала Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  – робоча температура фотоелемента, К;  $A$  – фактор ідеальності фотоелемента, що залежить від технології виготовлення;  $U$  – напруга на виході фотоелемента, В.

$$I_{\Phi C} = G \cdot (I_{K3} + K_I (T - T_{CT})), \quad (2)$$

де  $I_{K3}$  – струм короткого замикання фотоелемента, А;  $K_I$  – температурний коефіцієнт струму короткого замикання;  $T_{CT}$  – стандартна (еталонна) температура фотоелемента, К.

На практиці більшого застосування набула **спрощена модель ідеального фотоелемента**, в якій втрати на послідовний опір приймаються  $R_{II O} = 0$ , а втрати на шунтуючий опір –  $R_{III} = \infty$ . Зважаючи на прийняті умови математичний опис вихідної потужності фотоелемента можна представити так:

$$P_{\Phi EB} = U_{\Phi EB} \cdot \left( G [I_{K3} + K_I (T - T_{CT})] - I_D \left( \exp \frac{q U_{\Phi EB}}{k \cdot T \cdot A} - 1 \right) \right) \quad (3)$$

Представлене рівняння (3) дозволяє враховувати вплив температури навколишнього середовища ( $T$ ) та інтенсивності сонячного випромінювання ( $G$ ) на вихідну потужність фотоелемента, однак цю модель необхідно також прив'язати до навантаження з метою оцінки його впливу на роботу системи АЗСЕМ в цілому, а це в свою чергу дасть змогу оцінити ефективність використання виробленої енергії та якість забезпечення.

Ефективність використання ФЕБ в автономних енерговузлах визначається кліматометеорологічними умовами місцевості. У разі вибору ФЕБ для автономного енергозабезпечення проводиться попередня енергетична оцінка потенціалу сонячної енергії, за якою визначають придатність конкретної території до використання фотоелектричних установок.

Виробіток електроенергії, яку можна отримати за рахунок фотоелектричного перетворення ( $W_{\Phi EB}$  кВт\*год), з урахуванням (3) можна визначити як

$$W_{\Phi EB}(G, T) = \tau_{\Phi EB} \cdot P_{\Phi EB}(G, T) = \tau_{\Phi EB} \cdot U_{\Phi EB} \cdot I_{\Phi EB}(G, T) = \tau_{\Phi EB} \cdot U_{\Phi EB} \cdot \left( G (I_{K3} + K_I (T - T_{CT})) - I_D \cdot \left( e^{\frac{q \cdot U_{\Phi EB}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \right), \quad (4)$$

де  $\tau_{\Phi EB}$  – час роботи фотобатареї, год.

Рівняння (4) можна вважати математичним описом вироблення електроенергії фотоелектричної батареї (або елемента) за конкретних умов інтенсивності сонячного випромінювання ( $G$ ), температури фотоелемента ( $T$ ) та часом перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію ( $\tau_{\Phi EB}$ ).

### Аналіз кліматометеорологічних умов для оцінки можливого енергозабезпечення АЗСЕМ від фотоелектричної установки.

Промодельюємо в програмному середовищі Matlab 2015 можливість забезпечення енергією АЗСЕМ від ФЕБ з урахуванням розподілу інтенсивності сонячного випромінювання для м. Мелітополь Запорізької області, використавши при цьому реальні експериментальні дані вимірювання інтенсивності сонячної радіації ( $G$ ) для заданої місцевості.

Для аналізу надходження сонячної радіації використаємо дані Мелітопольської актинометричної станції за 2017 рік, що реєструвалися протягом року з інтервалом 10 хв (24262 відліки).

Загальний вигляд закономірностей надходження сонячної радіації (рис. 3), приведеної до зимового часу, ілюструє її екстремальний характер як протягом доби, так і протягом року.

Тривалість світлового дня змінюється від семи год у січні-грудні до 15 год у червні-липні симетрично відносно 11,5 год.

Слід зазначити, що добова інтенсивність сонячної радіації відрізняється від теоретичної косинусоїди внаслідок деякого розширення за рахунок радіації вранішньої та вечірньої зорі та практичної стабільності її максимальних значень від 10 до 13 год.

Максимальні значення сонячної радіації близько  $1000 \text{ Вт/м}^2$  з варіацією всього в 7 % мають місце з 70 до 250 днів, тобто протягом половини року, зовні цього інтервалу радіація зростає в першій половині року від 500 до  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , а в другій половині спадає до  $400 \text{ Вт/м}^2$ . Таким чином, у залежності сонячної радіації від дня року можна виділити пряму радіацію і вважати її наближено косинусоїдальною, що накладається на сталу складову розсіяної радіації з максимальною інтенсивністю  $400 - 500 \text{ Вт/м}^2$ .

Якщо взяти середню і максимальну сонячну радіацію (рис. 4), то середня складає близько половини максимальної і тримається на постійному рівні близько  $500 \text{ Вт/м}^2$  від 50 до 270 днів. Але за таких загальних закономірностей добова сонячна радіація надзвичайно залежить від хмар-

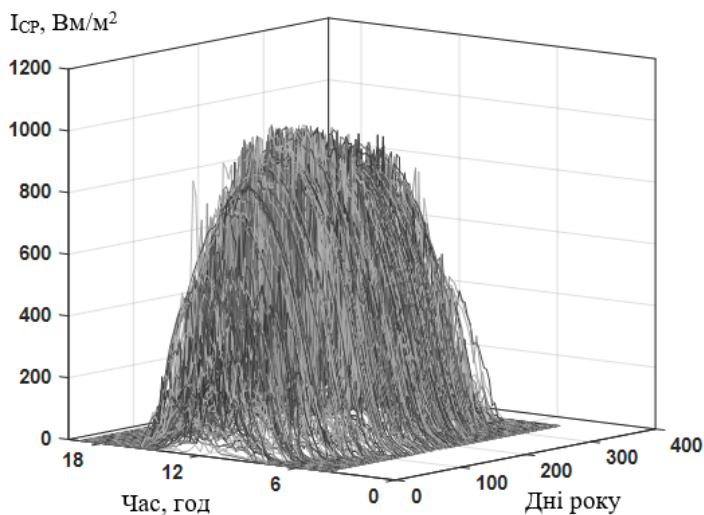


Рис. 3

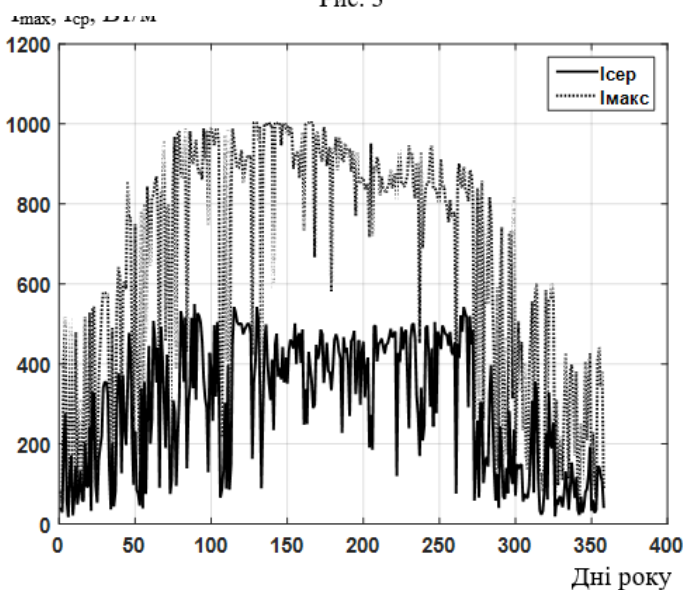


Рис. 4

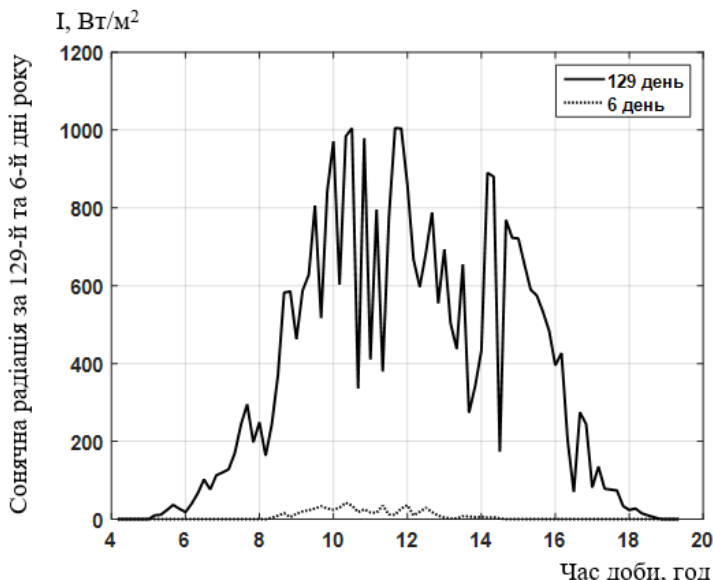


Рис. 5

ності (рис. 5) і може протягом літнього дня в сонячний день за мінливої хмарності змінюватися від 1000 до 150 – 400 Вт/м<sup>2</sup>.

Якщо ж брати до уваги і хмарні дні, то справа значно ускладнюється. Максимальна сонячна радіація 6 січня за день складає всього 42 Вт·год/м<sup>2</sup>, тоді як, наприклад, 23 травня – 1005 Вт·год /м<sup>2</sup>, тобто залежно від пори року і метеорологічних умов рівень сонячної радіації може змінюватися в 25 разів, що разом з відсутністю сонячної радіації вночі незалежно від того, що усереднення за інтервалами часу протягом року дає досить стабільні значення середньої сонячної радіації, свідчить про необхідність обов'язкового акумулювання сонячної енергії для забезпечення неперервної роботи зарядної станції.

Загальна інтегральна крива розподілу експериментальних даних (24262 значення) не відповідає жодному з теоретичних законів розподілу (рис. 6). Найближче відповідають їй експоненціальний і гама розподіли (на графіку вони практично співпадають), однак з 300 Вт/м<sup>2</sup> відповідність порушується, і експериментальний розподіл до максимального значення сонячної радіації досить добре описується рівномірним розподілом. Відповідно і гістограма експериментального розподілу (рис. 7) від 300 до 900 Вт/м<sup>2</sup> зберігає практично сталі значення, може бути з невеликим мінімумом, зважаючи на значне число даних.

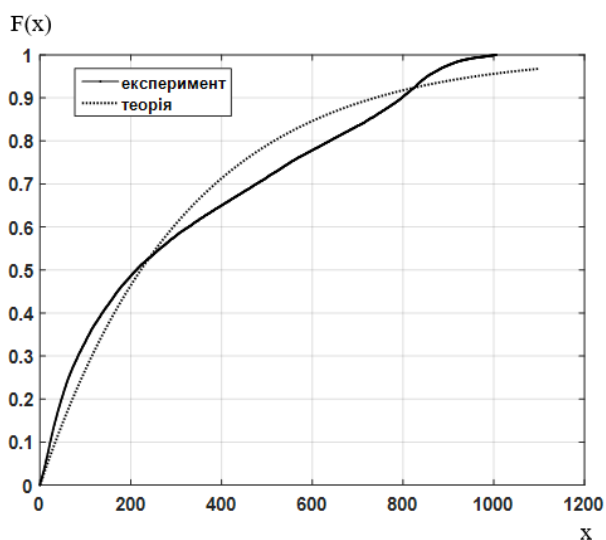


Рис. 6

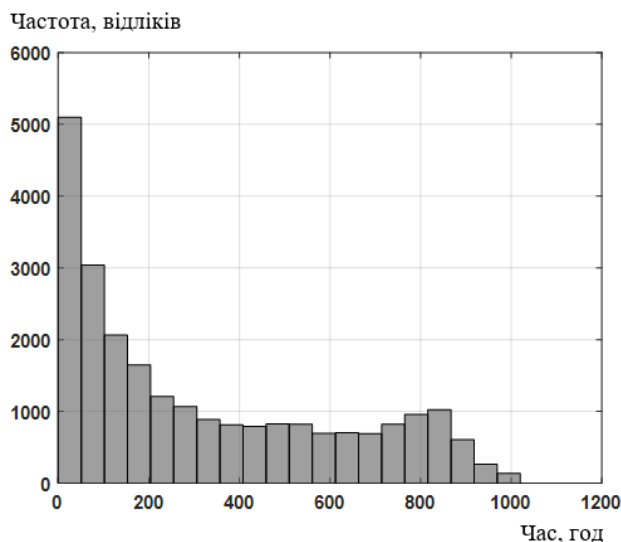


Рис. 7

Статистична перевірка гіпотез про закон розподілу для критичного значення критерію значимості за тестом Колмогорова – Смирнова дала такі значення: нормальний розподіл –  $3,2 \cdot 10^{-4}$ , Вейбула –  $1,2 \cdot 10^{-5}$ , логнормальний –  $1,1 \cdot 10^{-9}$ , логістичний –  $3,6 \cdot 10^{-4}$ , експоненціальний –  $4,2 \cdot 10^{-11}$ , гама –  $7,2 \cdot 10^{-7}$ . І тільки рівномірний розподіл є дійсно наближеним до експериментального, наприклад, для розподілу середніх значень сонячної радіації критерій значимості становить 0,0106.

Крім того, помісячне розглядання інтенсивності сонячної радіації показує, що за максимальної інтенсивності сонячної радіації 400–600 Вт/м<sup>2</sup> періоди, коли максимальна сонячна радіація не перевищує 200 Вт/м<sup>2</sup>, у листопаді, грудні та січні можуть сягати п'яти днів. У ці дні сумарне вироблення і накопичена енергія в акумуляторах мають бути достатніми для зарядження автомобіля з урахуванням короткого світлового дня. У той же час максимальна інтенсивність сонячної радіації в травні й в літні місяці досить стабільно перебуває на рівні 900–1000 Вт/м<sup>2</sup>, так що за вибраної необхідної для роботи АЗСЕМ енергоємності буферного акумулятора вироблення ФЕБ може перевищувати потреби.

Тому виникає необхідність оптимізувати сумарну ємність акумуляторної батареї, а, можливо, використати інші джерела енергії.

**Визначення потужності фотоелектричної системи АЗСЕМ для гарантованого заряду буферного акумулятора.** Використання фотоелектричних батарей у разі створення систем генерування є актуальним не лише для вироблення додаткової кількості електроенергії, але залишається доцільним при створенні АЗСЕМ, про що зазначалось вище. Робота такої зарядної станції буде ефективною за виконання умови:

$W_{\Phi EB} = W_{AB}^{\text{буф}} = W_{ВП}^{\text{АЗСЕМ}} + W_{AB}^{\text{ЕМ}}$ , де  $W_{AB}^{\text{буф}}$  – енергія буферної акумуляторної батареї, кВт\*год;  $W_{ВП}^{\text{АЗСЕМ}}$  – енергія, що витрачається на власні потреби АЗСЕМ, кВт\*год;  $W_{AB}^{\text{ЕМ}}$  – енергія, необхідна для зарядження ЕМ, кВт\*год.

Як відомо [10], енергія, необхідна для зарядження АБ електромобіля, визначається рівнянням

$$E_{зАБ}^{\text{ЕМ}} = \frac{1}{\eta_{зАБ}} \cdot U_{АБ} \cdot \int_{C_0}^{C_{\max}} C_{зАБ} \cdot \psi(C) \cdot dC = \frac{E_{АБ}^{\text{ЕМ}}}{\eta_{зАБ}}, \quad (5)$$

де  $E_{зАБ}^{\text{ЕМ}}$  – енергія, необхідна для зарядження електромобіля, кВт\*год;  $\psi(C)$  – функція, що враховує випадковий характер та частоту настання процесу зарядження АБ електромобіля;  $\eta_{зАБ}$  – коефіцієнт корисної дії зарядження АБ електромобіля;  $U_{АБ}$  – напруга АБ ЕМ, В.

Коефіцієнт запасу енергії  $K_{3E}^{\text{БУФ}}$  буферної АБ визначається як

$$K_{3E}^{\text{БУФ}} = \frac{k_{ДЕ} \cdot k_{ВП}}{\eta_{АБ}^{\text{БУФ}}}, \quad (6)$$

де  $k_{ДЕ}$  – коефіцієнт додаткової енергії, що має передбачатися в буферній АБ;  $k_{ВП}$  – коефіцієнт урахування впливу величини споживання енергії на власні потреби АЗСЕМ;  $\eta_{АБ}^{\text{БУФ}}$  – повний коефіцієнт корисної дії (заряд-розряд) буферної АБ.

Враховуючи математичний опис роботи ФЕБ (4), опис роботи електрохімічної акумуляторної батареї (5), а також коефіцієнт запасу енергії, розглянутий вище математичний опис системи АЗСЕМ з використанням ФЕБ заряду  $n$  електромобілів можна записати так:

$$\begin{aligned} & \tau_{\Phi EB} \cdot U_{\Phi EB} \cdot \left( G(I_{K3} + K_I(T - T_{CT})) - I_D \cdot \left( e^{\frac{q \cdot U_{\Phi EB}}{A \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \right) = \\ & = K_{3E}^{\text{БУФ}} \left( E_{ВП}^{\text{АЗСЕМ}} + \frac{n}{\eta_{зАБ}} U_{АБ} \int_{C_0}^{C_{\max}} C_{зАБ} \cdot \psi(C) \cdot dC \right) \end{aligned} \quad (7)$$

де  $E_{ВП}^{\text{АЗСЕМ}}$  – енергія на власні потреби АЗСЕМ, кВт\*год;  $E_{АБ}^{\text{БУФ}}$  – енергія буферної акумуляторної батареї, кВт\*год;  $n$  – кількість електромобілів.

Вираз (7) можна представити у вигляді енергій за допомогою рівняння

$$E_{\Phi EB} = E_{АБ}^{\text{БУФ}} = K_{3E}^{\text{БУФ}} \cdot (E_{ВП}^{\text{АЗСЕМ}} + E_{зАБ}^{\text{ЕМ}}), \quad (8)$$

Аналіз модельного ряду комерційних електромобілів показав, що на сьогоднішній день питомі витрати на пробіг 1 км шляху в режимі ЕРА (Environmental Protection Agency – американський вимірювальний цикл, що найкраще підходить для умов доріг України) коливаються від 0,133 (BMW i3) до 0,261 кВт\*год (Toyota RAV4 EV), тобто від 13,3 до 26,1 кВт\*год/100 км пробігу відповідно. У цьому разі повна енергія АБ сучасних електромобілів знаходиться в межах (16-100) кВт\*год, а в перспективі можна очікувати її збільшення, проте з заявлених на найближчі п'ять років перспективних новинок легкових електромобілів значення енергії АБ ЕМ не перевищує 100 кВт\*год.

Проаналізуємо можливість забезпечення електроенергією АЗСЕМ з використанням ФЕБ для крайніх умов, тобто для днів з найменшим максимальним значенням інтенсивності сонячного випромінювання на 06.01.2017 та для доби з максимальним значенням інтенсивності сонячного випромінювання (10.05.2017), враховуючи температуру навколишнього середовища [11].

Для визначення енергоемності буферної АБ АЗСЕМ урахуємо:

1) власні потреби АЗСЕМ (освітлення та ін.)  $E_{ВП}^{\text{АЗСЕМ}}$  становлять 3 кВт\*год на день;

2) залишкове зарядження АБ ЕМ у разі заїзду електромобіля на зарядну станцію становить 20 % від його максимального значення, тобто  $0,2 \cdot E_{AB}^{BY\Phi}$ , оскільки за менших залишкових значень заряду акумулятора електромобіль може не доїхати до зарядної станції;

3) ймовірність заїзду електромобіля на зарядну станцію в разі залишкового зарядження АБ ЕМ від 80 % і більше є рівною 0, оскільки дозарядження електромобіля в діапазоні від  $(0,8 \div 1)E_{AB}^{EM}$  необхідно проводити в стаціонарному (не прискореному) режимі зарядження;

4) додаткова енергія буферної АБ АЗСЕМ має становити не менше 20 % від номінального значення, тобто  $k_{DE} = 1,2$ ;

5) максимальне значення напруги буферної АБ ЕЗСЕМ є рівним  $U_{AB}^{BY\Phi} = 600 \text{ В}$ ;

6) коефіцієнт корисної дії буферної акумуляторної батареї є рівним 80 % ( $\eta_{AB}^{BY\Phi} = 0,8$ ), а коефіцієнт зарядження акумуляторної батареї електромобіля – рівним 90 % ( $\eta_{зАБ} = 0,9$ ).

Розглянемо можливість забезпечення зарядження одного електромобіля з найбільшою бортовою АБ, наприклад  $E_{AB}^{EM} = 100 \text{ кВт} \cdot \text{год}$  (Tesla Model X) з нульовою залишковою енергією (електромобіль з повністю розрядженими тяговими АБ, доставлений за допомогою аварійного канату чи привезений евакуатором). У такому разі енергія буферної АБ для гарантованого забезпечення роботи АЗСЕМ у випадку зарядження ЕМ з максимальною потребою у  $80 \text{ кВт} \cdot \text{год}$  має становити

$$E_{AB}^{BY\Phi} = \frac{3 + \frac{80}{0,9}}{0,8} = 137,83 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (9)$$

Для визначення необхідної потужності фотоелектричної установки беремо для розрахунків параметри фотомодуля LG365Q1C-A5 (Південна Корея) [12], для якого є характерним підвищений у 21,1 % ККД, а максимальна потужність у разі  $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$  складає  $P_{ФЕБ} = 365 \text{ Вт}$ .

Враховуючи прийняту щоденну потребу для зарядження одного електромобіля в  $137,82 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ , а також показники інтенсивності сонячного випромінювання для доби з найменшим надходженням сонячної енергії згідно з рівнянням (4) з використанням програмного середовища Matlab 2015, визначаємо, що потужність фотоелектричної станції для прийнятих умов має складати  $P_{ФЕС} = 1264,2 \text{ кВт}$ . У цьому випадку, в разі встановлення такої потужності ФЕС в інші дні з більшим надходженням сонячного випромінювання спостерігається виробіток надлишкової енергії, що вимагатиме вирішення питання її подальшого використання. У випадку відімкнення ФЕС у міру повного зарядження буферної АБ виникатиме проблема неефективного використання генеруючого устаткування.

Водночас, використовуючи показники інтенсивності сонячного випромінювання для доби з найбільшим надходженням сонячної енергії, визначаємо, що потужність фотоелектричної станції для прийнятих умов має складати  $P_{ФЕС} = 21,44 \text{ кВт}$ . У цьому випадку в разі встановлення такої потужності ФЕС в інші дні з меншим надходженням сонячного випромінювання спостерігатиметься недозарядження буферної АБ і відповідно робота АЗСЕМ буде неефективною.

**Висновки.** 1. У результаті програмного моделювання в середовищі Matlab 2015 встановлено, що необхідна потужність ФЕС у складі АЗСЕМ для зарядження одного ЕМ з максимальною енергоємністю тягової АБ коливається в межах від  $P_{ФЕС} = 21,44 \text{ кВт}$  для доби з найбільшим надходженням сонячного випромінювання до  $P_{ФЕС} = 1264,2 \text{ кВт}$  для доби з найменшим надходженням сонячної енергії. Такий великий розбіг потужності ФЕС свідчить про необхідність комплексного використання декількох відновлюваних джерел енергії, наприклад «ВЕС-ФЕС», «ГЕС-ФЕС», «Біогазова електростанція – ФЕС», що дасть змогу зменшити вплив коливання інтенсивності сонячного випромінювання та раціоналізувати необхідну потужність ФЕС.

2. Використання ФЕС з мінімальною потужністю  $P_{ФЕС} = 21,44 \text{ кВт}$  може забезпечити зарядження ЕМ з максимальною енергоємністю в дні з меншим надходженням сонячного

випромінювання (у порівнянні з добою максимального сонячного випромінювання) за умови приїзду ЕМ з більшим значенням залишкової енергії тягової АБ або за умови приїзду на АЗС електромобіля з меншою енергоємністю тягової АБ.

3. Запропоновано математичний опис забезпечення енергією автономної зарядної станції електромобілів з використанням фотоелектричних установок для зарядження електричних транспортних засобів з урахуванням нелінійного характеру виробітку електроенергії та стохастичного характеру її споживання протягом доби. Цей математичний опис може бути поширеним на інші потенційно перспективні місця встановлення автономних зарядних станцій електромобілів у різних регіонах України за умови наявності об'єктивних вихідних даних по розподілу інтенсивності сонячного випромінювання.

*Фінансується за держбюджетною темою «Розвиток теоретичних засад і розроблення рекомендацій по створенню високоефективних систем заряду накопичувачів енергії електромобільного транспорту з урахуванням вимог забезпечення електромагнітної сумісності з системою електроживлення» (шифр «Параметр»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 05.07.2016 р., протокол № 11. Державний реєстраційний номер роботи 0116U008455.*

1. НКРЕКП інформує про розвиток сектору ВДЕ за 2018 рік.  
URL: <http://www.nerc.gov.ua/index.php/web/data/filearch/postanovy/2018/p1825-d-2018.pdf?news=8586>  
(дата звернення: 10.01.2019).
2. Electric cars can now charge on sunlight day and night with Tesla Powerpacks at new 'Smart Solar Charging' station.  
URL: <https://electrek.co/2018/06/05/electric-cars-charge-on-sunlight-tesla-powerpacks-smart-solar-charging-station/>  
(дата звернення: 10.01.2019).
3. Lead the charge. Drive solar. URL: <https://pairedpower.com/> (дата звернення: 14.01.2019).
4. Electric vehicle autonomous renewable charger. URL: <http://www.envisionsolar.com/ev-arc/> (дата звернення: 14.01.2019).
5. Chandra G.R, Mouli P., Bauer M. Zeman System design for a solar powered electric vehicle charging station for workplaces. Applied Energy. 15 April 2016. Vol. 168. Pp. 434 – 443.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.110>
6. Rasolomampionona D., Maeght François, Cresson Pierre-Yves, Favier Patrick, Experimental solar-based charging station for electric vehicles. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. Electrical Review, R. 87 NR 6.2011. Pp. 58 – 62  
URL: <http://pe.org.pl/articles/2011/6/9.pdf>
7. Кузнецов М. П. Імовірнісні характеристики потужності вітроелектричних станцій у складі електроенергетичної системи: дис. на здоб. наук. ступ. д-ра техн. наук : 05.14.08. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Київ. 2015. 302 с.
8. Wasynczuk O., Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1983. 102. Pp. 3031 – 3037.
9. Phang J.C.H., Chan D.S.H., Philips J.R. Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters. Electronics Letters. 1984. 20. Pp. 406 – 408.
10. Будько В.І. Розроблення математичної моделі роботи автономної зарядної станції електромобілів від вітроелектричних установок. Відновлювана енергетика. 2017. № 3. С. 6 – 13.
11. Архив погоды в Мелитополі. URL: <https://meteo.ua/archive/34/kyiv/2017-1-6> (дата звернення: 15.01.2019).
12. LG365Q1C-A5. URL: <https://www.lg.com/us/business/search.lg?search=LG365Q1C-A5> (дата звернення: 15.01.2019).

УДК 621.345

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АВТОНОМНЫХ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И БУФЕРНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ЭНЕРГИИ

**В.Б. Павлов**<sup>1</sup>, докт. техн. наук, **В.И. Будько**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, **В.М. Кириленко**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, **М.А. Будько**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, **К.В. Кириленко**<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> – Інститут електродинамики НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [mobil99@ukr.net](mailto:mobil99@ukr.net),

<sup>2</sup> – Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: [solar\\_budko@ukr.net](mailto:solar_budko@ukr.net)

Предложено математическое описание системы автономной зарядной станции электромобилей с использованием фотоэлектрических установок. Обоснована необходимая энергоемкость буферного аккумулятора энергии при реализации автономных зарядных станций электромобилей с использованием фотоэлектрических установок как генераторов электроэнергии. Рассмотрены особенности обеспечения электрической энергией зарядной станции на основе реальных данных интенсивности солнечного излучения. Установлен диапазон мощностей фотоэлектрических установок, при которых обеспечивается заряд буферного аккумулятора с учетом реальных показателей солнечного излучения. Библ. 12, рис.7.

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая система, аккумуляторная батарея, электромобиль, автономная зарядная станция.

## FEATURES OF OPERATION OF AUTONOMOUS CHARGER STATIONS BY ELECTRIC VEHICLES USING SOLAR PHOTOELECTRIC SYSTEMS AND BUFFER BATTERIES OF ENERGY

V.B. Pavlov<sup>1</sup>, V.I. Budko<sup>2</sup>, V.M. Kyrylenko<sup>2</sup>, M.O. Budko<sup>2</sup>, K.V. Kyrylenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [mobil99@ukr.net](mailto:mobil99@ukr.net),

<sup>2</sup> – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute",  
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: [solar\\_budko@ukr.net](mailto:solar_budko@ukr.net),

*The mathematical description of the system of an autonomous charging station of electric vehicles using photovoltaic systems is proposed. The necessary energy intensity of the buffer energy accumulator is substantiated in the case of the implementation of autonomous charging stations of electric vehicles with the use of photovoltaic installations as generators of electric energy. The features of electric power supply of the charging station on the basis of real data of intensity of solar radiation are considered. A range of capacities of a photoelectric installation has been established at which the charge of a buffer accumulator is ensured, taking into account actual solar indicators. References 12, figures 7.*

**Keywords:** photovoltaic system, battery, electric vehicle, autonomous charging station.

1. NKREKP informuie pro rozvytok sektoru VDE za 2018 rik.  
URL: <http://www.nerc.gov.ua/index.php/web/data/filearch/postanovy/2018/p1825-d-2018.pdf?news=8586>  
(accessed 10.01.2019). (Ukr)
2. Electric cars can now charge on sunlight day and night with Tesla Powerpacks at new 'Smart Solar Charging' station.  
URL: <https://electrek.co/2018/06/05/electric-cars-charge-on-sunlight-tesla-powerpacks-smart-solar-charging-station/>  
(accessed 10.01.2019). (Eng)
3. Lead the charge. Drive solar. URL: <https://pairedpower.com/> (accessed 14.01.2019). (Eng)
4. Electric vehicle autonomous renewable charger. URL: <http://www.envisionsolar.com/ev-arc/>  
(accessed 14.01.2019). (Eng)
5. Chandra G.R, Mouli P.Bauer M.Zeman System design for a solar powered electric vehicle charging station for workplaces. Applied Energy. 15 April 2016, Vol. 168. Pp. 434 – 443.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.110> (Eng)
6. Rasolomampionona D., Maeght François, Cresson Pierre-Yves, Favier Patrick. Experimental solar-based charging station for electric vehicles. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY. Electrical Review. R. 87 NR 6.2011 Pp. 58 – 62.  
URL: <http://pe.org.pl/articles/2011/6/9.pdf> (Eng)
7. Kuznetsov M.P. Probabilistic characteristics of the power of wind power plants in the electric power system: diss. to bake sciences step Dr. Tech. Sciences: 05.14.08. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Nuclear Energy. Kyiv, 2015. 302 p. (Ukr)
8. Wasynczuk O., Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1983. 102. 3031 – 3037. (Eng)
9. Phang J.C.H., Chan D.S.H., Philips J.R. Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters. *Electronics Letters*. 1984. 20. Pp 40 – 408. (Eng)
10. Budko V.I. Rozroblennia matematychnoi modeli roboty avtonomnoi zariadnoi stantsii elektromobiliv vid vitroelektrychnykh ustanovok. Vidnovliuvana enerhetyka. No 3. 2017. Pp. 6 – 13 (Ukr)
11. Arhiv pogodyi v Melitopole. URL: <https://meteo.ua/archive/34/kyiv/2017-1-6> (accessed 15.01.2019). (Rus)
12. LG365Q1C-A5. URL: <https://www.lg.com/us/business/search.lg?search=LG365Q1C-A5>  
(accessed 15.01.2019). (Eng)