

УДК 621.31:621.383

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-1(23)-249-264

Олександр Глушко, Сергій Степенко

ПАРАМЕТРИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ І ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ У СКЛАДІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Забезпечення автономної, високоефективної та надійної генерації електроенергії системами на основі фотоелектричних перетворювачів є актуальним завданням. Недостатньо уваги приділено факторам, що впливають на ефективність і надійність роботи таких систем. Відповідно до розглянутих факторів впливу, найбільш критичним є перегрівання. Для запобігання перегріванню необхідно забезпечити достатнє тепловідведення, збільшити розмір з'єднувальної коробки для кращого розсіювання тепла назовні. Крім того, варто використовувати діоди з меншим струмом витоку.

Ключові слова: електроенергетичні системи; ефективність; надійність; параметри; фактори впливу; фотоелектричні перетворювачі; характеристики.

Рис.: 20. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Національний екологічний центр України наголошує, що нині глобальна зміна клімату – одна з найгостріших екологічних проблем, що стоять перед людством. Найрозвиненіші країни відповідають на цей виклик активними кроками з декарбонізації енергетики, впровадженням альтернативних джерел енергії. Окрім екологічного, в Україні мають місце економічні та геополітичні чинники, що додатково загострюють ситуацію. Енергоємність ВВП України у 2015 році становила 0,98 т н.е./тис. дол США ВВП, що в 4,7 рази вище, ніж у сусідніх європейських країнах. Надвисока частка імпорту нафти й газу робить державу заручником зовнішнього постачальника і переводить питання енергонезалежності у площину національної безпеки. Нова Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» спрямована на вирішення проблем енергетичної безпеки в умовах виживання держави за обставин зовнішньої агресії. Головна мета розвитку енергетики на період до 2035 року – забезпечення енергетичної безпеки і перехід до енергоефективного та енергозаощадливого використання і споживання енергоресурсів із впровадженням інноваційних технологій.

Постановка проблеми. Поточні дослідження виконуються в межах науково-дослідної роботи молодих вчених № 0120U101554 «Автономні електроенергетичні системи з високою ефективністю, покращеними масогабаритними характеристиками та підвищеною надійністю для спеціальних застосувань». Наукова робота присвячена розробці комплексу методів та засобів для забезпечення автономної, високоефективної та надійної генерації електроенергії у несприятливих умовах зовнішнього середовища. У результаті виконання проєкту планується реалізувати експериментальний зразок автономної електроенергетичної системи потужністю близько 3 кВт, що може бути базовим для подальшої комерціалізації.

Фотоелектричні перетворювачі (ФЕП) у складі електроенергетичних систем можуть зазнавати атмосферного та фізичного впливу, що знижуватиме ефективність або перешкоджатиме нормальній роботі. Одним із можливих впливів є затінення фотоелектричних панелей. Вибір складових елементів для побудови фотоелектричної системи має поєднувати в собі надійність, простоту експлуатації та помірну ціну. Для врахування цих вимог при побудові автономної електроенергетичної системи необхідно детально розглянути параметри та характеристики ФЕП, а також виділити основні фактори, що впливають на ефективність і надійність їхньої роботи у складі таких систем [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [2] описується процес, при якому фотоелектричні панелі зазнають неоднорідного рівня опромінення, окремі захисні діоди можуть увімкнутись, що може суттєво вплинути на загальне виробництво електроенер-

гії. Збільшення потужності, що продукується цілим масивом, можна отримати за допомогою його електричної реконфігурації, тобто зміни послідовно-паралельного з'єднання між панелями, з яких він складається. Розрахунок електричного з'єднання між панелями, що забезпечує максимальну потужність, що продукується, є комбінаторною проблемою, що вимагає потужних методів оптимізації. В [2] основна увага присвячена формулюванню процедури оптимізації для визначення найкращої електричної конфігурації панелей. Запропонований алгоритм потребує відносно простих математичних розрахунків і використовує векторизовану структуру; таким чином, підходить для реалізації у будь-якій вбудованій системі з метою реконфігурації масиву ФЕП у реальному часі. Алгоритм пояснюється на пілотному прикладі, а його ефективність демонструється шляхом застосування до реального масиву фотопанелей. Результати показують, що алгоритм розраховує оптимізовану конфігурацію з низьким обчислювальним навантаженням. Робота [3] присвячена параметричній ідентифікації фотоелектричних модулів. Запропонований підхід застосовується до значної кількості характеристик ФЕП, що отримані експериментальним шляхом.

Тривалі гарантії фотоелектричних модулів (25 років) є життєво важливим фактором економічної життєздатності фотоелектричних систем [4]. Проте нещодавні дослідження показали, що модулі можуть зазнати ранньої деградації, яка обертається зменшенням виробництва електроенергії або навіть пошкодженням всього фотомодуля. Авторами [4] представлений метод, спрямований на виявлення деградації модуля. Він виявляє та визначає кількісну оцінку деградації за допомогою двох показників, які спрямовані на оцінку приросту опору послідовності модулів. Цей параметр є одним із тих, що зазнають найбільшого впливу під час деградації. Збільшення значення послідовного опору оцінюється шляхом визначення похибки прогнозування положення точки максимальної потужності. Це значення отримується шляхом порівняння експериментальних вимірювань з однодіодною моделлю ФЕП [3]. Запропонований метод перевірений експериментально і його порівнюють з іншими методами, представленими в літературі. Результати показують, що запропоновані показники здатні точно оцінити прирости послідовного опору при низькій чутливості до значень освітленості та температури. Ця функція підвищує точність та надійність діагностичних процесів та систем моніторингу.

У сучасній літературі пропонуються деякі підходи, що використовують безпосередні рівняння для ідентифікації п'яти параметрів однодідної моделі, що описує фотоелектричну панель [5]. Ці методи дозволяють уникнути ітеративного вирішення нелінійної системи рівнянь, збіжність яких дуже чутлива до розв'язку. Тому вони особливо придатні для ідентифікації параметрів у реальному часі та для впровадження на недорогих платформах з невисокою продуктивністю. У роботі аналізується застосовність деяких безпосередніх методів, попередньо затверджених у стандартних умовах випробувань, для великого класу панелей в робочих умовах, що відрізняються від стандартних. У дослідженні розглядається як зведений метод перетворення параметрів моделі ФЕП, так і новий підхід. Аналіз дозволяє оцінити найбільш підходящі рівняння перетворення параметрів для кожного з розглянутих методів явної ідентифікації, підкресливши ефективність таких явних підходів в різних умовах експлуатації. Наведені результати на основі експериментальних даних щодо двох комерційних фотоелектричних панелей підтверджують аналіз.

Робота [6] присвячена моделюванню масивів ФЕП з метою оцінки ефективності системи. У публікації [7] увага зосереджена на фотоелектричній системі, що базується на трирівневому квазіімпедаансному інверторі з фіксованою нейтральною точкою. Алгоритм відстеження точки максимальної потужності (MPPT) на основі зворотного зв'язку

dP/dV був використаний у фотоелектричній системі для регулювання тривалості активних станів силових ключів та досягнення максимальної потужності. Коректна робота системи у випадку різних ступенів опромінення демонструється моделюванням у програмному забезпеченні Matlab/Simulink.

У статті [8] було розглянуто застосування фотоелектричних систем у несприятливих умовах. Зазначається, що використання альтернативних джерел енергії на основі фотоелектричних перетворювачів у провідних арміях світу набуває все більшої актуальності за рахунок прогресу сучасних технологій виробництва самих фотоелектричних перетворювачів, покращення їх масогабаритних показників та непомітності (безшумності) роботи. Досвід проведення антитерористичної операції на сході України (нині – Операція об'єднаних сил) вказує на крайню необхідність розробки автономних систем електроживлення на основі, альтернативних джерел енергії для використання їх як на стаціонарних віддалених об'єктах так і з комплексами бойової екіпіровки.

У роботі [9] представлені результати експериментального дослідження ефективності та температурних параметрів інвертора з напівпровідниковими елементами на основі карбїду кремнію (SiC). Дослідження проводилось у системі електроживлення з джерелом однофазного постійного струму. Інвертор, побудований з використанням квазі-імпедансної топології на основі SiC діодів та SiC транзисторів (MOSFET) демонструє експериментально підтверджену ефективність 97,1 %. Були представлені та обговорені результати, що підтверджують ефективну роботу перетворювача. Завдяки своїй високій ефективності та безпечній експлуатації при високих температурах напівпровідникових приладів розроблене рішення є можливим для застосування у фотоелектричних системах. Досліджено температурну поведінку напівпровідників, а також представлені детальні результати. У дослідженні встановлено номінальну потужність 1,8 кВт, однак інвертор був перевірений на безпечну роботу та продемонстрував прийнятну ефективність при навантаженні до +33 % від номінальної потужності.

Публікація [10] присвячена фотоелектричній системі з тривірневим квазі-імпедансним інвертором з фіксованою нейтральною точкою. Алгоритми відстеження точки максимальної потужності на основі зворотного зв'язку dP/dV , збурення та спостереження, інкрементної провідності були адаптовані та перевірені в цій топології, використовуючи активний стан наскрізної провідності як змінну управління. Представлені результати моделювання за допомогою SimPowerSystem у складі Matlab/Simulink.

Основна увага в статті [11] зосереджена на двоступеневих фотоелектричних мікроінверторах із використанням перетворювача постійного струму. Широкий діапазон вхідної напруги фронтального перетворювача дозволяє працювати в затінених умовах, але призводить до посередніх характеристик у типовому діапазоні напруги. Такими мікроінверторами можна керувати за допомогою фіксованих або змінних методів контролю напруги постійного струму. В останньому випадку значно покращується ефективність перетворювача в діапазоні найбільш імовірних значень точки максимальної потужності (MPP). Однак, процес підвищення напруги фронтального перетворювача призводить до помітних коливань ефективності в діапазоні вхідної напруги. Як результат, звичайні зважені показники ефективності не можуть бути використані для прогнозування річного виробництва енергії мікроінверторами. У роботі пропонується нова методологія оцінки річного виробництва енергії на основі річних профілів сонячного опромінення та температури навколишнього середовища. Використовуючи цю методологію, надається кількісна оцінка щорічного виробництва енергії для двох географічних розташувань.

У роботі [12] представлено порівняльне дослідження двох сонячних інверторів на основі квазі-імпедансної топології (Quasi-Z-Source – QZS). Перше рішення включає дворівневий інвертор QZS з усіма силовими елементами на основі SiC, а друге рішення побудовано на основі трирівневого QZS-інвертора із фіксованою нейтральною точкою з транзисторами (Si MOSFET). Було враховано кілька критеріїв: розмір пасивних елементів, теплова конструкція та розміри радіаторів, перенапряга в напівпровідниках та показники ефективності. Масив фотопанелей потужністю 1,8 кВт був обраний як система тематичного дослідження.

Стаття [13] представляє техніко-економічне обґрунтування підходу з використанням здвоєного інвертора з квазіімпедансною ланкою. Як правило, здвоєння часто використовується для підвищення ефективності та щільності потужності, що дозволяє подолати проблему великих пасивних елементів перетворювачів на основі квазіімпедансної топології. Основна увага приділяється застосуванню методу здвоєння з точки зору порівняння кількох важливих параметрів інвертора. Аналіз включає втрати, розміри конденсатора та індуктивності, а також витрати напівпровідників. Теоретичне порівняння базується на моделі інвертора та моделі втрат. Надано моделювання та експериментальну перевірку теоретичних положень. Було встановлено, що можна досягти зменшення обсягу індуктора на 40 %, а також підвищення ефективності на 15–20 %.

Останніми роками спостерігається різке збільшення використання поновлювальних джерел електроенергії. Основні топології перетворювачів добре розглянуті та досліджені [14]. Проте мало уваги приділяється методам керування двонаправлених перетворювачів для малої потужності. Тому є потреба в аналізі та порівнянні методів керування неізолюваних перетворювачів для подальшого виявлення і застосування найбільш оптимальних. Результати порівняння показують, що метод передбачення по моделі показує кращі динамічні характеристики, однак вимагає більших затрат на розрахунки, що варто враховувати при проектуванні системи загалом.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питанням забезпечення автономної, високоефективної та надійної генерації електроенергії електроенергетичними системами на основі ФЕП, що працюють у несприятливих умовах зовнішнього середовища, приділяється значна увага. У публікаціях [15; 16; 17] розглядаються складові частини автономних електроенергетичних систем на основі ФЕП, зокрема акумуляторні батареї та фотоелектричні панелі. Аналізуються деякі параметри та характеристики цих елементів, однак недостатньо уваги приділено виділенню та узагальненню факторів, що впливають на ефективність і надійність роботи таких систем.

Метою статті є розгляд фотоелектричних перетворювачів, їх параметрів та характеристик, а також основних факторів, що впливають на ефективність та надійність роботи фотоелектричних панелей у складі електроенергетичних систем.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 пояснюються визначення основних елементів фотоелектричної частини [2]. Комірка (Cell) – це найменша невідима частина фотоелектричної панелі, яка перетворює сонячну енергію в електричну. Модуль (Module) – це фотоелектрична панель з послідовно з'єднаних комірок, які утворюють єдину структуру. Ряд (String) – це серія послідовно з'єднаних фотоелектричних модулів. Масив (Array) – це паралельне з'єднання рядів.

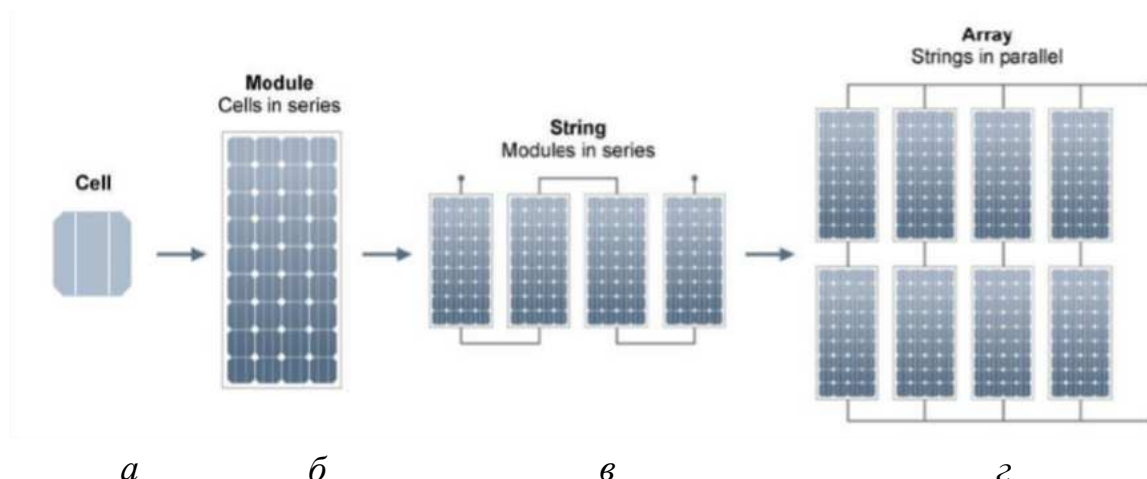


Рис. 1. Від комірки до масиву:

a – комірка; б – модуль; в – ряд; г – масив

На рис. 2 представлений принцип фотоелектричного ефекту, що відбувається в комірці, коли на неї потрапляє сонячне випромінювання.

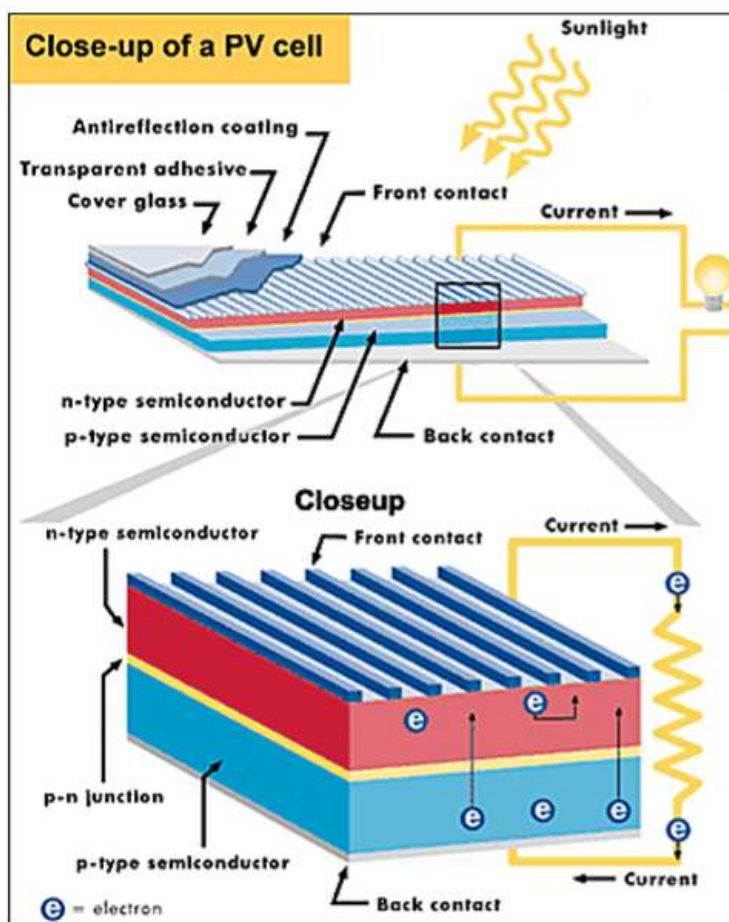


Рис. 2. Фотоелектричний ефект у комірці

Фотоелектрична комірка складається зі скла (cover glass), прозорого клею (transparent adhesive), антивідбиваючого покриття (antireflection coating), верхнього контакту (front contact), напівпровідника n-типу (n-type semiconductor), напівпровідника p-типу (p-type semiconductor), нижнього контакту (back contact).

Між напівпровідниками n-типу та р-типу існує тонка область, яка називається р-n переходом (p-n junction). При сонячному опроміненні з верхнього та нижнього контактів знімається струм.

На рис. 3 представлені складові частини фотоелектричного модуля.

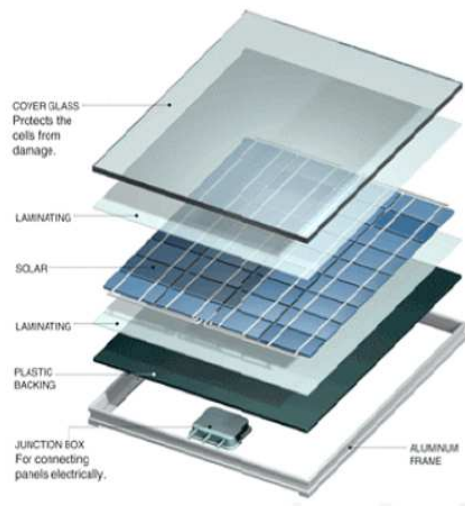
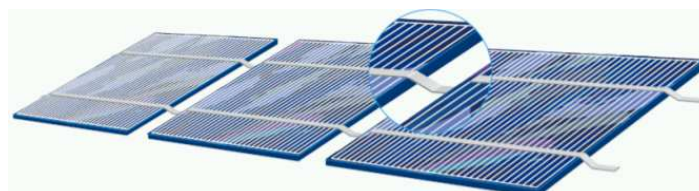


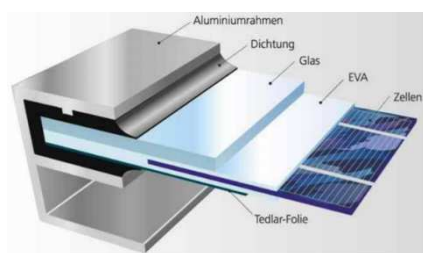
Рис. 3. Структура фотоелектричного модуля

Покриття зі скла (cover glass) забезпечує захист комірок від пошкодження, ламінування (laminating), фотоелектричний шар (solar), пластикова підкладка (plastic backing), з'єднувальна коробка для електричного підключення панелей (junction box for connecting panels electrically), рама з алюмінію (aluminum frame).

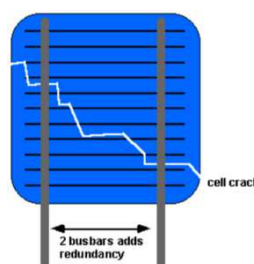
На рис. 4 представлена конструкція фотоелектричної панелі в розрізі, а також її конструктивні особливості.



а



б



в

Рис. 4. Структура фотоелектричної панелі:

а – загальний вигляд комірок; б – структура панелі у розрізі; в – комірка з шинами

Структура фотоелектричної панелі у розрізі виглядає наступним чином: алюмінієва рама (aluminiumrahmen), ущільнювач (dichtung), скло (glas), прозора плівка (EVA), комірки (zellen), тедларова фольга (tedlar folie). Збірні шини комірок (cell busbars) утримують їх разом навіть з тріщиною безпосередньо на самій комірці. Реалізована надлишковість шляхом введення двох паралельних шин для забезпечення надійності.

На рис. 5 представлені графіки залежності потужності фотоелектричної панелі від напруги при різних значеннях температури.

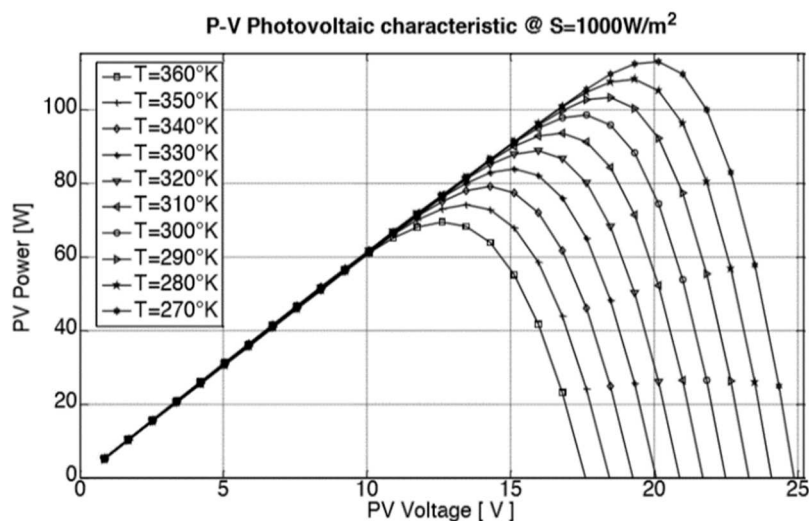


Рис. 5. Фотоелектрична характеристика панелі при сталій інтенсивності випромінювання ($S=const$)

З наведених залежностей видно, що при підвищенні температури панелі її вихідна потужність знижується.

На рис. 6 представлені графіки залежності потужності фотоелектричної панелі від напруги при різних інтенсивностях випромінювання ($S = 100, 200, \dots, 1000 \text{ W/m}^2$) та сталій температурі ($T_{amb} = 298 \text{ K}$).

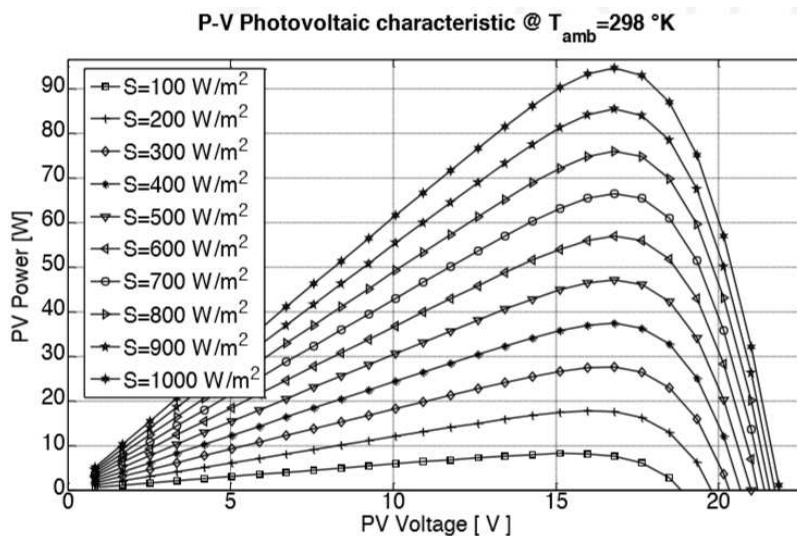


Рис. 6. Фотоелектрична характеристика панелі при сталій температурі $T=const$

З даних залежностей видно, що при збільшенні інтенсивності випромінювання, вихідна потужність панелі збільшується.

При дослідженні характеристик, наведених на рис. 5 та рис. 6 можна бачити, що постійна робоча напруга не забезпечує максимальну потужність у будь-яких робочих умовах.

На рис. 7 представлені графіки залежностей потужності від напруги при різних комбінаціях інтенсивностей випромінювання (S) та температури (T).

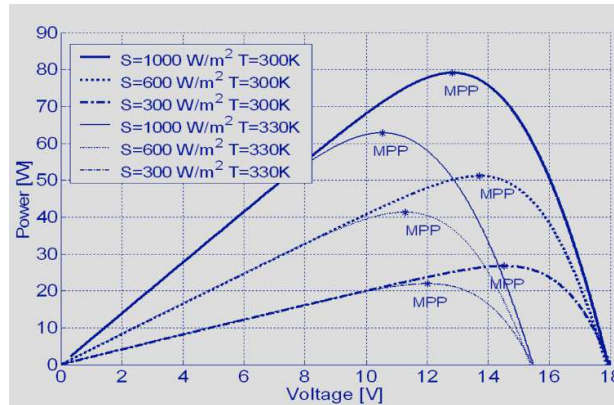


Рис. 7. Графіки залежностей потужності від напруги

На рис. 8 представлена однодіодна модель фотоелектричної комірки [2] без втрат енергії.

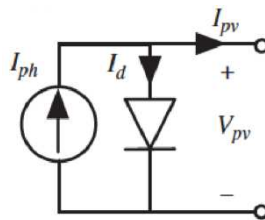


Рис. 8. Модель однієї комірки без втрат:

I_{ph} – струм фотоіндукції; I_d – струм діода; V_{pv} – напруга комірки

Рівняння струму до моделі комірки без втрат представлено формулою (1).

$$i(v) = I_{ph} - I_s \cdot (e^{\frac{q}{kT} \cdot v} - 1), \tag{1}$$

де I_{ph} – струм фотоіндукції, I_s – струм насичення, q – заряд електрона, k – стала Больцмана, T – температура, V – напруга.

На рис. 9 представлена модель однодіодного фотомодуля [3].

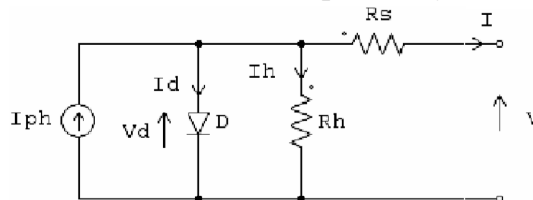


Рис. 9. Matlab модель однодіодного фотомодуля:

I_{ph} – струм фотоіндукції; R_s , R_h – втрати, пов'язані зі струмом та напругою;

I_d , V_d – струм та напруга на діоді; I_h , I – струми на опорах R_h та R_s відповідно

Фактори, що знижують продуктивність фотоелектричних панелей. На рис. 10 представлено спосіб розташування фотопанелей, коли їх масив орієнтований під різними кутами до сонця.



Рис. 10. Спосіб розташування масиву фотопанелей під різними кутами до сонця

Перевага такого розташування фотопанелей полягає в тому, що сонячне випромінювання впродовж дня постійно потрапляє на певну частину панелей. Недоліком такого розташування є те, що не всі панелі задіяні для максимального виробництва електроенергії в певні відрізки часу через різний кут повороту до сонця. Так, зранку задіяна більшою мірою одна частина панелей, в обід – друга, ввечері – третя.

Розглянемо явище затінення та його вплив на функціонування фотоелектричних перетворювачів. Земля постійно обертається навколо Сонця і кут падіння сонячного випромінювання до земної поверхні постійно змінюється впродовж світлового дня. Об'єкти, які розміщені неподалік масиву фотопанелей, у певний момент часу можуть дати тінь, тим сам знижуючи загальну продуктивність системи при отриманні електроенергії. Тінь від таких об'єктів можна розділити на статичну (дерева, будинки тощо) (рис. 11, а) та швидко змінювану – динамічну (тінь від паруса при русі такого човна по воді, тінь від птаха, що сів на фотопанель тощо) (рис. 11, б).



а

б

Рис. 11. Приклад об'єктів, що створюють тінь:

а – статична тінь; б – швидко змінювана тінь

Якщо масив фотопанелей розташований статично, то кут між площиною панелі та площиною падаючого сонячного випромінювання постійно змінюється, змінюючи тим самим отримувану потужність. Таким чином, при установці рядів із масивами панелей необхідно врахувати цей кут та відстань між рядами, щоб тінь сусіднього ряду не падала на попередній впродовж світлового дня. Приклади, як не потрібно та як потрібно розташовувати ряди, представлені на рис. 12.



а

б

Рис. 12. Розташування рядів PV-панелей:

а – неправильне розташування ряду; б – правильне розташування ряду

На рис. 13 показано підключення фотоелектричних модулів із використанням обхідних та блокуючих діодів.

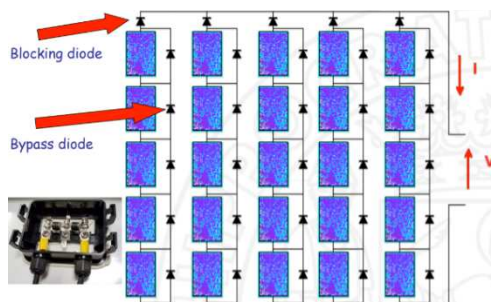


Рис. 13. Підключення фотоелектричних модулів

Блокуючий діод (blocking diode) не дає струму протікати у зворотньому напрямку. Обхідний діод (bypass diode) необхідний тоді, коли один з модулів знаходиться в тіні або не може генерувати електроенергію. Оскільки модулі з'єднані послідовно, щоб електричне з'єднання не переривалося, а струм протікав далі, для цього слугує обхідний діод.

Умовно поведінку затіненої комірки можна описати як вузьке місце в трубопроводі. При затіненні комірки фотоелектричний струм зменшується в порівнянні з номінальним струмом при нормальній роботі комірки.

Визначимо таке поняття як глобальна точка максимальної потужності GMPP (global maximum power point). Припустимо, що існують дві точки максимальної потужності (MPP), де фотопанель (або масив фотопанелей) здатні ефективно генерувати енергію, тоді рівняння для незатіненого модуля буде мати вигляд:

$$P_{MPP1} = I_1 \cdot \frac{V_{OS}}{2}, \quad (2)$$

де I_1 – струм від незатіненого модуля, V_{OS} – напруга холостого ходу модуля.

Рівняння для затіненого модуля буде мати такий вигляд:

$$P_{MPP1} = I_2 \cdot V_{OS}, \quad (3)$$

де I_2 – струм від затіненого модуля, V_{OS} – напруга холостого ходу модуля.

Залежності струму та напруги I-V для незатіненого та затіненого модуля представлено на рис. 14.

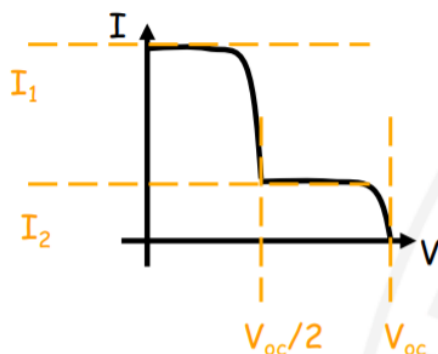


Рис. 14. Залежність I-V

де I_1 – струм від незатіненого модуля, I_2 – струм від затіненого модуля, V_{OS} – напруга холостого ходу модуля.

Взаємозв'язок між двома потужностями залежить від сили струмів, зокрема, від рівня затіненості. Ця залежність відображається формулою (4).

$$\Rightarrow I_1 > 2 \cdot I_2 \Leftrightarrow P_{MPP1} > P_{MPP2}, \text{ інакше } P_{MPP2} > P_{MPP1} \quad (4)$$

де I_1 – струм від незатіненого модуля; I_2 – струм від затіненого модуля; P_{MPP1} – потужність для максимальної точки потужності незатіненого модуля; P_{MPP2} – потужність для максимальної точки потужності затіненого модуля.

Коли виникає часткове затінення модулів, то деякі ряди фотопанелей можуть продовжувати виробляти енергію, а деякі (ті, що знаходяться в тіні) – її поглинатимуть. Тому використання блокуючих діодів є корисним.

Розглянемо комірку прямого та зворотного зміщення. На рис. 15 представлено графік потужності комірки, що виробляється та поглинається нею.

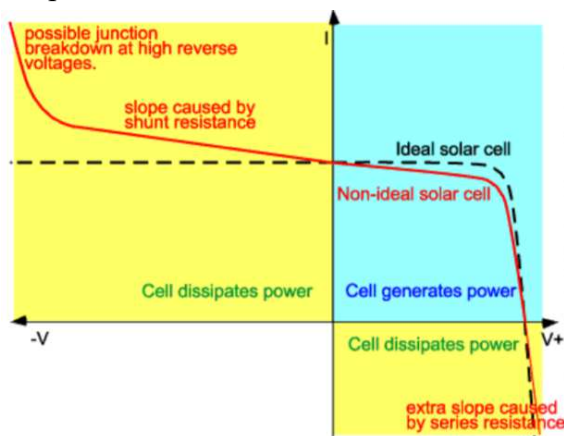


Рис. 15. Потужність, що виробляється та поглинається коміркою

Вертикальна вісь – це струм, горизонтальна вісь – це від’ємна та додатна напруга. Пунктиром показана крива ідеальної фотоелектричної комірки (ideal solar cell). Неперервна крива – характеристика реальної фотоелектричної комірки. Ліва частина від вертикальної осі та нижня частина від горизонтальної осі (виділено жовтим кольором) демонструють, що комірка розсіює енергію. Права частина від вертикальної осі (виділено блакитним кольором) демонструє, що комірка виробляє енергію. Ділянка кривої зліва – це можливе пошкодження з’єднання при високих зворотних напругах (possible junction breakdown at high reverse voltages). Ділянка кривої правіше попередньої демонструє вплив шунтуючого опору (slope caused by shunt resistance). Ділянка кривої справа демонструє вплив послідовного опору (extra slope caused by series resistance). Таким чином, щоб розрахувати потужність, потрібно обчислити площу під необхідною ділянкою кривої.

На рис. 16 представлений графік, на якому показані криві струму та напруги (I-V) модуля, що складається із 42 послідовно з’єднаних комірок, 9 з яких затінені, а 33 – повністю освітлені.

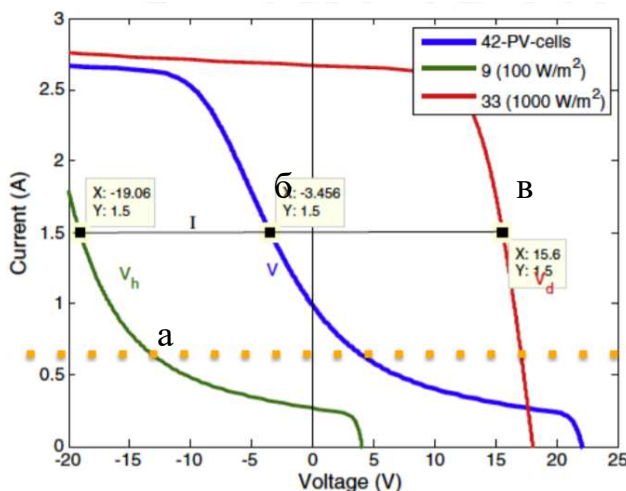


Рис. 16. Графік (I-V) частково затіненого модуля:

a – крива 9 затінених комірок; б – загальна залежність для модуля загалом із 42 комірок; в – крива 33 освітлених комірок

Локальний перегрів. Термін «пошкодження від гарячої точки» (hot spot damage) – це постійне пошкодження або деградація фотокомірки, що є прямим результатом високотемпературних плям. Увесь ряд комірок здатен виробляти енергію, але деякі комірки її поглинають, внаслідок цього поглинання комірка може локально перегрітися та вийти з ладу.

На рис. 17 представлено фото працюючого модуля зроблене за допомогою тепловізора.

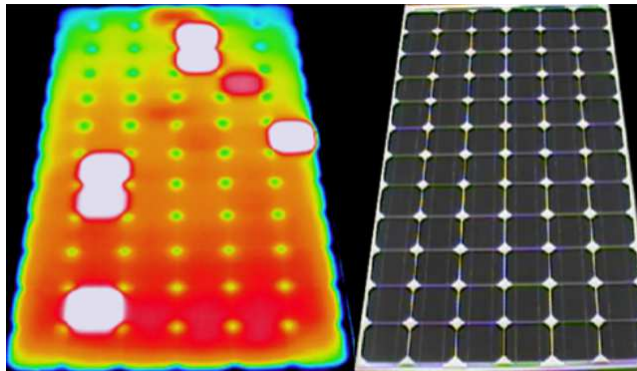


Рис. 17. Видяд модуля через тепловізор

Яскраві плями – це перегріті комірки, які можуть вийти з ладу. На рис. 18 представлено фото пошкоджених комірок від перегріву.

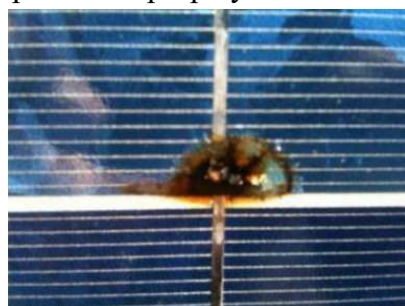
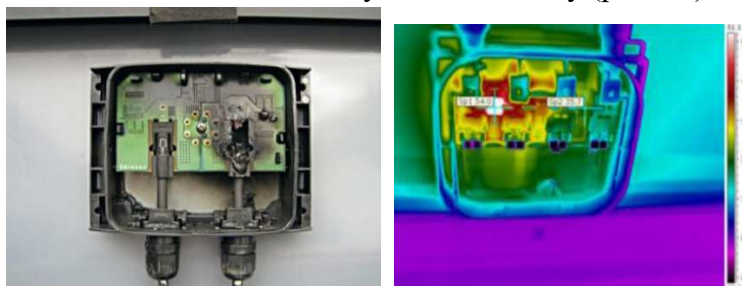


Рис. 18. Фото модуля з пошкодженими комірками

При підвищенні температури, тепло не розподіляється, а локалізується, внаслідок цього може виникнути ризик пожежі. При температурі комірки більше $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається локальний термічний пробій. При температурі $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вище пошкоджується герметик, що може викликати інші серйозні проблеми. Типова комірка має напругу пробою приблизно від -15 В до -20 В . Для комірок другого покоління Махеоп напруга пробою сонячної комірки становить близько $-5,5\text{ В}$ та $-2,5\text{ В}$ для комірок Махеоп третього покоління. При менших напругах зворотного зміщення виділяється менше енергії, а отже, і менше тепла в ній розсіюється. Чергування освітлення і затінення фотоелектричної панелі сильно навантажує обхідні діоди, внаслідок чого вони можуть вийти з ладу (рис. 19).



а

б

Рис. 19. Руйнування обхідного діоду внаслідок перегріву:
а – зруйнований обхідний діод внаслідок перегріву;
б – обхідний діод у режимі роботи (вид через тепловізор)

Як видно з рис. 19, б, температура обхідного діоду при його роботі може досягати 54 °С і вище. Як обхідний діод використовують діоди Шотткі. Тепловий вихід з ладу таких діодів може виникнути при чергуванні станів сонце/тінь. Під час затінення (діод увімкнено) температура діода зростає, коли тінь зникає, він все ще гарячий, тому має великий струм витоку, при цьому його температура знову підвищується. Якщо втрати електроенергії, викликані струмом витоку вище, ніж у прямому режимі, тоді діод переходить у тепловий відсік допоки не відбудеться незворотній процес пошкодження.

На рис. 20, а зеленим зображена крива, яка показує, що теплова потужність вузла може розсіюватися (Heat power the junction can dissipate), синім зображена крива втрат провідності (Conduction losses), червоним зображена крива зворотних втрат (reverse losses). При температурі обхідного діоду до 70 °С немає ризику, що він вийде з ладу. При температурі обхідного діоду вище 152 °С відбувається тепловий відсік (рис. 20, б).

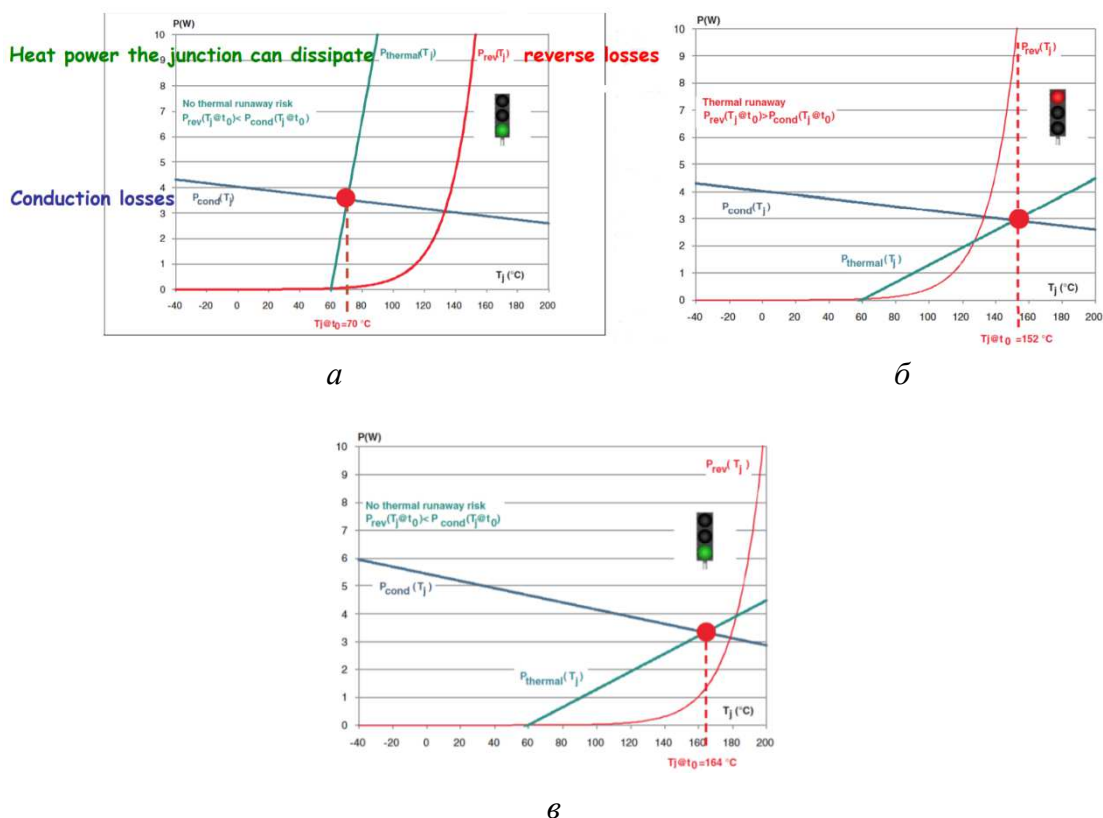


Рис. 20. Графік роботи обхідного діода:

а – нормальна робота обхідного діоду; б – критичні умови для роботи обхідного діода; в – внесення конструктивних змін

Висновки. Відповідно до розглянутих факторів впливу, можна стверджувати, що найбільш критичним є перегрівання. Для запобігання перегріванню необхідно забезпечити достатнє тепловідведення (збільшити розмір з'єднувальної коробки для кращого розсіювання тепла назовні). Крім того, варто використовувати діоди з меншим струмом витоку. Вони будуть мати більш високе падіння прямої напруги і розсіювання потужності, тому температура його р-п переходу при вимиканні стане вищою, але загальний ефект буде позитивним. Такий підхід дозволяє діоду залишатися в робочому стані при більш високій температурі (рис. 20, в).

Розмір рядів має вирішальне значення для збереження фотоелектричних комірок від пошкодження при перегріванні. Також можуть вийти з ладу обхідні діоди, тому необхідно це враховувати на стадії проектування. Важливе значення для їх збереження та надійності роботи відіграє конструкція з'єднувальної коробки.

Список використаних джерел

1. Pless S., Deru M., Torcellini P., Hayter S. Technical Report National Renewable Energy Laboratory. 2005. 52 p.
2. Orozco-Gutierrez M. L., Spagnuolo G., Ramirez-Scarpetta J. M., Petrone G., Ramos-Paja C. A. Optimized Configuration of Mismatched Photovoltaic Arrays. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2016. Vol. 6, № 5. Pp. 1210-1220.
3. Spagnuolo G., Lappalainen K., Valkealahti S., Manganiello P. Photovoltaic Module Parametric Identification. *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*. Otranto, Italy, 2019. Pp. 302-305.
4. Bastidas-Rodríguez J. D., Franco E., Petrone G., Ramos-Paja C. A., Spagnuolo G. Model-Based Degradation Analysis of Photovoltaic Modules Through Series Resistance Estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016. Vol. 62, № 11. Pp. 7256-7265.
5. Di Piazza M. C., Luna M., Petrone G., Spagnuolo G. Translation of the Single-Diode PV Model Parameters Identified by Using Explicit Formulas. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2017. Vol. 7, № 4. Pp. 1009-1016.
6. Orozco-Gutierrez M. L., Spagnuolo G., Ramos-Paja C. A., Ramirez-Scarpetta J. M., Ospina-Agudelo B. Enhanced simulation of total cross tied photovoltaic arrays. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2019. Vol. 158. Pp. 49-64.
7. Roncero-Clemente C., Stepenko S., Husev O., Miñambres-Marcos V., Romero-Cadaval E., Vinnikov D. Three-Level Neutral-Point-Clamped Quasi-Z-Source Inverter with Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems. *Technological Innovation for the Internet of Things. DoCEIS 2013. IFIP Advances in Information and Communication Technology / Camarinha-Matos L.M., Tomic S., Graça P. (Eds.). Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. Vol. 394.*
8. Степенко С. А., Башинський К. В. Оцінка можливості використання альтернативних джерел енергії на основі фотоелектричних перетворювачів у Збройних Силах України. *Системи озброєння і військова техніка*. 2016. № 4. С. 50-56.
9. Stepenko S., Husev O., Vinnikov D., Pimentel S. P., Prystupa A. Experimental Efficiency and Thermal Parameters Evaluation in Full-SiC Quasi-Z-Source Inverter. *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. Riga, Latvia, 2019. Pp. 1-6.
10. Roncero-Clemente C., Husev O., Miñambres-Marcos V., Stepenko S., Romero-Cadaval E., Vinnikov D. Comparison of three MPPT algorithms for three-level neutral-point-clamped qz-source inverter. *2013 International Conference-Workshop Compatibility And Power Electronics*. Ljubljana, Slovenia, 2013. Pp. 80-85.
11. Chub A., Vinnikov D., Stepenko S., Liivik E., Blaabjerg F. Photovoltaic Energy Yield Improvement in Two-Stage Solar Microinverters. *Energies*. 2019. № 12. P. 3774.
12. Stepenko S., Husev O., Vinnikov D., Roncero-Clemente C., Sergio Pires Pimentel, Santasheva E. Experimental Comparison of Two-Level Full-SiC and Three-Level Si-SiC Quasi-Z-Source Inverters for PV Applications. *Energies*. 2019. № 12. P. 2509.
13. Stepenko S., Husev O., Vinnikov D., Fesenko A., Matiushkin O. Feasibility Study of Interleaving Approach for Quasi-Z-Source Inverter. *Electronics*. 2020. Vol. 9(2). P. 277. <https://doi.org/10.3390/electronics9020277>.
14. Тительмаєр К., Хоменко М. Порівняння методів керування двофазним двонаправленим перетворювачем постійної напруги з чергуванням фаз. *Технічні науки та технології*. 2018. № 3(13). С. 196–208.
15. Рева К., Степенко С. Дослідження характеристик елементів автономних систем електроживлення на основі фотоелектричних перетворювачів. *Технічні науки та технології*. 2017. № 2. С. 162-171.
16. Фесенко А. П., Єршов Р. Д., Степенко С. А. Огляд та обґрунтування вибору акумуляторних батарей для автономної системи електроживлення на основі фотоелектричних перетворювачів. *Технічні науки та технології*. 2017. № 1 (7). С. 177-186.

17. Захарченко Д., Степенко С. Огляд та обґрунтування вибору накопичувачів електроенергії для роботи електроенергетичних об'єктів. *Технічні науки та технології*. 2020. № 4(22). С. 198-209.

References

1 Pless, S., Deru, M., Torcellini, P., Hayter, S. (2005). *Technical Report National Renewable Energy Laboratory*.

2. Orozco-Gutierrez, M. L., Spagnuolo, G., Ramirez-Scarpetta, J. M., Petrone, G., Ramos-Paja, C. A. (2016). Optimized Configuration of Mismatched Photovoltaic Arrays. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(5), pp. 1210-1220.

3. Spagnuolo, G., Lappalainen, K., Valkealaht, S., Manganiello, P. (2019). Photovoltaic Module Parametric Identification. *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)* (pp. 302-305).

4. Bastidas-Rodríguez, J. D., Franco, E., Petrone, G., Ramos-Paja, C. A., Spagnuolo, G. (2016). Model-Based Degradation Analysis of Photovoltaic Modules Through Series Resistance Estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(11), pp. 7256-7265.

5. M Di Piazza M. C., Luna M., Petrone G., Spagnuolo G. (2017). Translation of the Single-Diode PV Model Parameters Identified by Using Explicit Formulas. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(4), pp. 1009-1016.

6. Orozco-Gutierrez, M. L., Spagnuolo, G., Ramos-Paja, C. A., Ramirez-Scarpetta, J. M., Ospina-Agudelo B. (2019). Enhanced simulation of total cross tied photovoltaic arrays. *Mathematics and Computers in Simulation*, 158, pp. 49-64.

7. Roncero-Clemente, C., Stepenko, S., Husev, O., Miñambres-Marcos, V., Romero-Cadaval, E., Vinnikov, D. (2013). Three-Level Neutral-Point-Clamped Quasi-Z-Source Inverter with Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems. In *Camarinha-Matos L.M., Tomic S., Graça P. (Eds.) Technological Innovation for the Internet of Things. DoCEIS 2013. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 394.

8. Stepenko, S. A., Bashynskiy, K. V. (2016). Otsinka mozhlivosti vykorystannia alternatyvnykh dzherel enerhii na osnovi fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv u Zbroinykh Sylakh Ukrainy [Assessment of the possibility of using alternative energy sources based on photovoltaic converters in the Armed Forces of Ukraine]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika – Weapons systems and military equipment*, (4), pp. 50-56.

9. Stepenko, S., Husev, O., Vinnikov, D., Pimentel, S. P., and Prystupa, A. (2019). Experimental Efficiency and Thermal Parameters Evaluation in Full-SiC Quasi-Z-Source Inverter. *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)* (pp. 1-6).

10. C Roncero-Clemente, C., Husev, O., Miñambres-Marcos, V., Stepenko, S., Romero-Cadaval, E., Vinnikov, D. (2013). Comparison of three MPPT algorithms for three-level neutral-point-clamped qz-source inverter, *2013 International Conference-Workshop Compatibility And Power Electronics* (pp. 80-85).

11. Chub, A., Vinnikov, D., Stepenko, S., Liivik, E., Blaabjerg, F. (2019). Photovoltaic Energy Yield Improvement in Two-Stage Solar Microinverters. *Energies*, (12), p. 3774.

12. Stepenko S., Husev O., Vinnikov D., Roncero-Clemente C., Sergio Pires Pimentel, Santasheva E. (2019). Experimental Comparison of Two-Level Full-SiC and Three-Level Si-SiC Quasi-Z-Source Inverters for PV Applications. *Energies*, (12), p. 2509.

13. Stepenko, S., Husev, O., Vinnikov, D., Fesenko, A., Matiushkin, O. (2020). Feasibility Study of Interleaving Approach for Quasi-Z-Source Inverter. *Electronics*, 9(2), p. 277. <https://doi.org/10.3390/electronics9020277>.

14. Tytelmaier, K., Khomenko, M. (2018). Porivniannia metodiv keruvannia dvofaznym dvonapravlenym peretvoriuvachem postiinoi napruhy z cherhuvanniam faz [Comparison of control methods for two-phase bidirectional DC-DC converter with phase alternation]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (3(13)), pp. 196–208.

15. Reva, K., Stepenko, S. (2017). Doslidzhennia kharakterystyk elementiv avtonomnykh system elektrozhyvlennia na osnovi fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv [Research of characteristics of elements of autonomous power supply systems on the basis of photoelectric converters]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (2), pp. 162-171.

16. Fesenko, A. P., Yershov, R. D., Stepenko, S. A. (2017). Ohliad ta obruntuvannia vyboru akumuliatornykh batarei dlia avtonomnoi systemy elektrozhylennia na osnovi fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv [Review and justification of the choice of batteries for autonomous power supply system based on photovoltaic converters]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (1(7)), pp. 177-186.

17. Zakharchenko, D., Stepenko, S. (2020). Review and Justification of the Energy Storage Devices Selection for Electric Power Facilities Operation. *Technical Sciences and Technologies*, (4 (22)), pp. 198-209.

UDC 621.31:621.383

Oleksandr Hlushko, Serhiy Stepenko

ANALYSIS OF PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF PHOTOVOLTAIC CONVERTERS

The main goal of energy development for the period up to 2035 is to ensure energy security and the transition to energy efficient and energy-saving use and consumption of energy resources with the introduction of innovative technologies.

Photovoltaic converters in power systems can be exposed to weathering and physics, which will reduce efficiency or interfere with normal operation. One of the possible effects is shading of photovoltaic panels. The choice of components for the construction of a photovoltaic system should combine reliability, ease of operation and reasonable price.

Considerable attention is paid to the issue of providing autonomous, highly efficient and reliable electricity generation by electric power systems based on photoelectric converters. The publications consider the components of autonomous power systems based on photovoltaic converters, in particular, batteries and photovoltaic panels. Some parameters and characteristics of these elements are analyzed, but not enough attention is paid to the selection and generalization of factors that affect the efficiency and reliability of such systems.

The aim of the article is to consider photovoltaic converters, their parameters and characteristics, as well as the main factors influencing the efficiency and reliability of their operation in power systems.

According to the considered factors of influence, it is possible to state that overheating is the most critical. To prevent overheating, it is necessary to ensure sufficient heat dissipation (increase the size of the junction box for better heat dissipation to the outside). In addition, you should use diodes with a lower leakage current. They will have a higher direct voltage drop and power dissipation, so the p-n junction temperature at shutdown will be higher, but the overall effect will be positive. This approach allows the diode to remain in working condition at a higher temperature.

Keywords: *electric power systems; efficiency; reliability; parameters; impacting factors; photovoltaic converters; characteristics.*

Fig.: 20. References: 17.

Глушко Олександр Володимирович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальної техніки, метрології та фізики, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
Hlushko Oleksandr – graduate student of Information and Measurement Engineering, Metrology and Physics Department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
E-mail: sashahlushkovo@gmail.com

Степенко Сергій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-вимірювальної техніки, метрології та фізики, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Stepenko Serhiy – PhD in Technical science, Associate Professor of Information and Measurement Engineering, Metrology and Physics Department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).