

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-281-1-76-84>

УДК 621.311

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗТАШУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ВИРОБНИЧОЇ ПОТУЖНОСТІ

Ричка Р.Ю.

OPTIMIZATION OF SOLAR PANEL PLACEMENT FOR MAXIMUM PRODUCTION CAPACITY

Rychka R.Yu.

Сонячна енергія, як один із чистих і відновлюваних ресурсів, має великий потенціал для задоволення зростаючого у світі попиту на енергію та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. В статті розглядаються методи підвищення ефективності виробництва сонячної енергії, з акцентом на тому, що попри зростаючу увагу до сонячної енергії в наукових дослідженнях, а також значний потенціал для її розвитку в Україні – це питання все ще є недостатньо опрацьованим та вивченим. Крім того, обґрунтовано актуальність цього питання в контексті необхідності швидкого та якісного відновлення руйнувань об'єктів критичної інфраструктури внаслідок російського вторгнення на територію України. Стаття містить всебічний огляд існуючих підходів щодо вивчення факторів, що впливають на ефективність використання сонячних панелей, таких як: кут падіння сонячного світла, якість матеріалів для виготовлення панелей, рівномірність освітлення, рівень атмосферного забруднення тощо. В дослідженні підтримано гіпотезу, що оптимальна продуктивність сонячних панелей досягається за умов, коли сонячне світло падає перпендикулярно панелі, за умов відсутності затінення або бруду на їх поверхні. Дослідження надає експериментальні пропозиції на підтримку використання систем слідування, для максимізації ефективності сонячних панелей шляхом регулювання кута нахилу панелей протягом дня. Також дослідження розглядає дві основні стратегії зниження вартості виробництва сонячної електроенергії: зменшення вартості сонячних модулів та підвищення ефективності збору енергії. Крім того, досліджується негативний ефект від затінення панелей та його вплив на технічні та економічні показники, виявляючи, що навіть часткове затінення може призвести до значного зниження ефективності сонячної електростанції. В роботі

обґрунтовано висновок, що впровадження систем слідування не тільки підвищує продуктивність сонячних електростанцій, але й скорочує період окупності інвестицій в їх будівництво. Цим дослідженням автор має бажання підтримати тривалу дискусію щодо використання відновлюваних джерел енергії, пропонуючи життєздатні рішення для підвищення ефективності систем сонячної енергії шляхом оптимізації розміщення сонячних панелей для їх максимальної продуктивності, що є критично важливим для забезпечення сталого розвитку та енергетичної безпеки.

Ключові слова: сонячні панелі, оптимізація розташування, виробнича потужність, сонячна енергетика, аналіз впливу тіні, відновлювані джерела енергії, технології моніторингу.

Вступ. Сучасний світ вже не перший рік стоїть перед гострими енергетичними викликами, спричиненими низкою факторів, серед яких, в першу чергу, слід виокремити: постійне зростання попиту на енергію, зменшення запасів традиційних енергоресурсів, посилення екологічних обмежень тощо. За таких умов, використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної, виходить на передній план як одне з ключових рішень для забезпечення енергетичної безпеки, економічного розвитку та зниження негативного впливу на довкілля.

В Україні, як країні із значним потенціалом сонячної інсоляції, особливо актуальною стає задача ефективного використання цього потенціалу для виробництва електроенергії. Втім, попри високий інтерес до розвитку сонячної енергетики, ряд проблематичних

аспектів стримує її масштабне розгортання. Серед основних викликів – бойові дії на територій нашої країни, доволі висока вартість обладнання, що робить його майже недоступним до широких верств населення, а також недостатня ефективність виробництва енергії, в першу чергу, через неоптимальне розміщення сонячних панелей та негативний вплив різних факторів (затіннення, пошкодження тощо), які доволі часто не враховуються при розміщенні сонячних електростанцій через брак відповідного досвіду або кваліфікації.

Попри значну актуальність цієї проблематики в контексті відновлення енергетичної галузі в умовах повоєнної відбудови України, станом на кінець 2023 року, на жаль ще не можна констатувати, що в країні у повній мірі сформовано підґрунтя для максимального використання всіх можливостей сонячної енергетики. Ця стаття зосереджується на дослідженні провідних наукових праць щодо пріоритетних шляхів підвищення техніко-економічної ефективності сонячних систем, що є критичним для максимізації їх виробничої потужності. Спроби вирішити ці проблеми мають не лише теоретичне значення, а й важливі практичні аспекти, оскільки це дозволить збільшити вихідну потужність сонячних електростанцій, знизити витрати на виробництво електроенергії та, відповідно, підвищити рентабельність інвестицій у сонячну енергетику.

Постійне зростання цін на традиційні (невідновлювані) джерела енергії, такі як: нафта, вугілля, газ, а також їх шкідливий вплив на навколишнє середовище та екосистему Землі – вже багато років спонукають людство до пошуку та вдосконалення нових технологій для використання альтернативних (відновлюваних) енергоресурсів. Останні роки має місце зростання інтересу до розробки та впровадження інноваційних сонячних енергетичних систем, які не лише сприяють забезпеченню потреб у енергії, але й відіграють ключову роль у досягненні сталого розвитку та зниженні вуглецевого сліду.

Серед багатьох наукових робіт, присвячених темі дослідження, авторства як вітчизняних, так й зарубіжних науковців, не можна не згадати низку напрацювань, які користуються підвищеною увагою та є основою для подальших наукових розвідок. Так, група науковців під керівництвом д.е.н., проф. Мельника Л. Г. детально та якісно описують процес вироблення електроенергії при застосуванні сонячного трекера, завдяки якому

відбувається збільшення кількості сонячної енергії, що потрапляє на модуль: «...оскільки найбільш ефективно використання сонячної енергії досягається завдяки напрямку променів перпендикулярно до сонячної панелі, необхідно обертати її в різні напрямки залежно від часу доби, для чого використовується так званий сонячний трекер» [1]. Ще одним цікавим дослідженням, що може бути розглянуто в контексті даної теми, є робота науковців Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» О. Загайнової та Г. Сердюкової, в якій детально аналізується принципи розробки та приєднання сонячної on-grid електростанції до електричної мережі. Авторки чітко описують ключові компоненти таких систем, включаючи сонячні панелі, інвертори та системи моніторингу, наголошуючи на важливості рівномірного розподілу енергії, що генерується сонячними панелями, та їхнього ефективного підключення до мережі [2]. З практичної точки зору, також дуже цікавим є дослідження, проведене групою науковців Української інженерно-педагогічної академії, які присвятили свої наукові розвідки питанням впливу затіннення та пошкоджень сонячних батарей на їх параметри, що є актуальним в контексті значної кількості пошкоджень об'єктів енергетичної інфраструктури, внаслідок бойових дій на території України [3]. Також, слід відзначити, що на питаннях ефективності використання сонячної енергії на сучасному етапі розвитку людства наголошують увагу не лише вітчизняні автори, а й багато зарубіжних. Так, протягом останнього десятиріччя, на багатьох наукових площадках по всьому світу неодноразово було акцентовано увагу, що метод прямого сонячного перетворення випромінювання в електричну енергію є, по-перше, найбільш зручним для споживача, тому що відразу утворюється вживаний вид електроенергії, а, по-друге, він вважається екологічно чистим засобом виробництва електроенергії [4; 5; 6].

Отже, в рамках цієї статті спробуємо відобразити не лише технічні аспекти розробки та використання сонячних електростанцій, але й зробити акцент та потенціалі відновлюваної енергії у зміцненні енергетичної безпеки та сприянні економічному зростанню. Саме останнє питання є особливо актуальним у контексті України, де, в умовах повоєнного відновлення та енергетичної децентралізації, зростаючий інтерес до відновлюваних джерел енергії вимагає ретельного аналізу та

впровадження перевірених, але, в той же час, передових технологій.

Метою роботи є опрацювання методичних підходів та розробка практичних рекомендацій щодо оптимізації розташування сонячних панелей, враховуючи кут падіння сонячних променів та мінімізацію впливу затінення та пошкоджень, з метою забезпечення максимальної продуктивності сонячних установок в географічних та кліматичних умовах України. Досягнення цієї мети передбачає аналіз впливу затінення на ефективність сонячних панелей і розробку рішень для їх мінімізації, що є особливо актуальним у контексті щільної забудови та наявності природних та штучних перешкод. Крім того, у роботі проведено огляд публікацій щодо впливу орієнтації сонячних панелей та їх затінення на виробничу потужність, в контексті дослідження шляхів підвищення техніко-економічної ефективності використання сонячної енергії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як відомо, найбільша ефективність сонячних панелей досягається, коли сонячні промені падають на них під прямим кутом, відсутні джерела тіні, а поверхня фотомодуля зберігається чистою. За таких умов сучасні полікристалічні сонячні панелі можуть мати ККД в межах 16-18%, а монокристалічні - 18-22%. В Україні, залежно від місця установки, масив сонячних панелей потужністю 1 кВт може виробити від 1000 до 1300 кВт-год за рік [7]. Отже, цілком логічним постає питання: яким чином підвищити продуктивність сонячної електростанції станції із застосуванням сучасних інженерних рішень?

Напрацювання багатьох видатних науковців, що здійснюють свої розвідки у галузі енергетики, економіки та екології, вказують, що на продуктивність сонячних модулів впливає значна кількість факторів [8; 9; 10; 11]:

- кут опромінення сонячного модуля;
- якість виготовлення сонячної панелі;
- рівномірність/нерівномірність освітлення;
- нагрів поверхні сонячної панелі;
- відбиття світлового потоку від поверхні сонячної панелі;
- рівень забруднення поверхні фотомодуля;
- рівень забруднення атмосфери.

Кут падіння сонячного світла на сонячний модуль залежить від орієнтації та кута нахилу

модуля. Рівномірність освітлення пов'язана з затіненням модуля або частини модуля. Короткострокове або тривале затінення частини фотомодуля зменшує кількість сонячного випромінювання, яке отримує фотомодуль, і знижує його ефективність.

Визначимо вплив деяких з цих факторів окремо.

З цією метою, в першу чергу, слід звернути увагу на наукову роботу [1], в якій проведено експериментальне дослідження параметрів фотомодулів. Під час дослідження авторами розраховувалося чотири варіанти встановлення фотомодулів:

1. Із застосуванням автоматичного наведення на Сонце (використано спеціальні геліотрекери на мікроконтролері Arduino).
2. Установка фотомодуля похилого типу.
3. Установка фотомодуля вертикального типу.
4. Установка фотомодуля із фіксованим кутом нахилу.

Цілком погоджуємося з авторами цього дослідження, що використання сонячних панелей із слідкуючими (трекерними) системами, які збільшують рівень опромінення сонячних панелей, є оптимальним в контексті отримання максимальної виробничої потужності (рис. 1). Саме такий підхід й забезпечує найбільш ефективне використання сонячних панелей, та допомагає планувати вихід енергії у розрізі різних місяців протягом року.

Більш того, «слідкуюча» система забезпечує електрогенерацію майже на 24% більше, ніж стаціонарний варіант установки (з фіксованим кутом) фотомодуля. Це дозволяє отримувати максимальну продуктивність сонячних панелей, а з економічної точки зору – зменшує строк окупності відповідних інвестицій.

В той же час, при затіненні одного сонячного елемента, у ньому зупиняється електрогенерація і, відповідно, не протікає струм, а сам затінений сонячний модуль блокує потік електроенергії у ланцюгу з послідовним з'єднанням. Тому, навіть незначне затінення одного фотомодуля у сонячній батареї призводить до значного зниження електрогенерації усієї сонячної електростанції. Цей значний вплив підтверджений неодноразово дослідним шляхом та описаний багатьма експертами, хто працює із сонячними електростанціями. Так, на рисунку 2 показано вплив затінення модуля на його вольт-амперну характеристику (далі – ВАХ) [12].

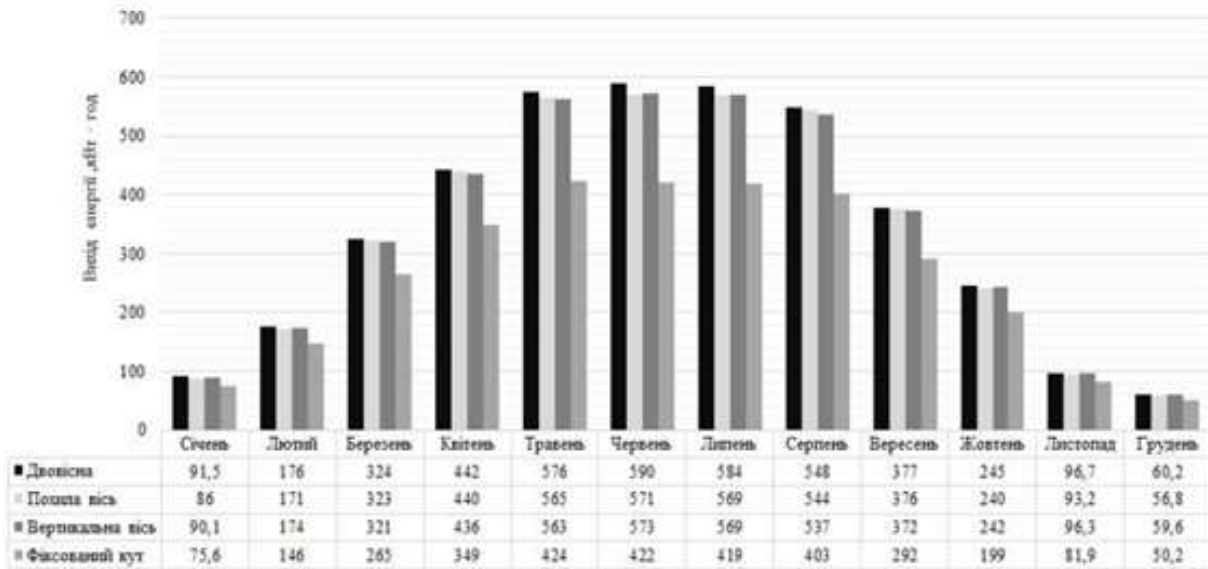


Рис. 1. Залежність середньомісячного виробництва електроенергії від варіанту встановлення сонячного модуля [1]

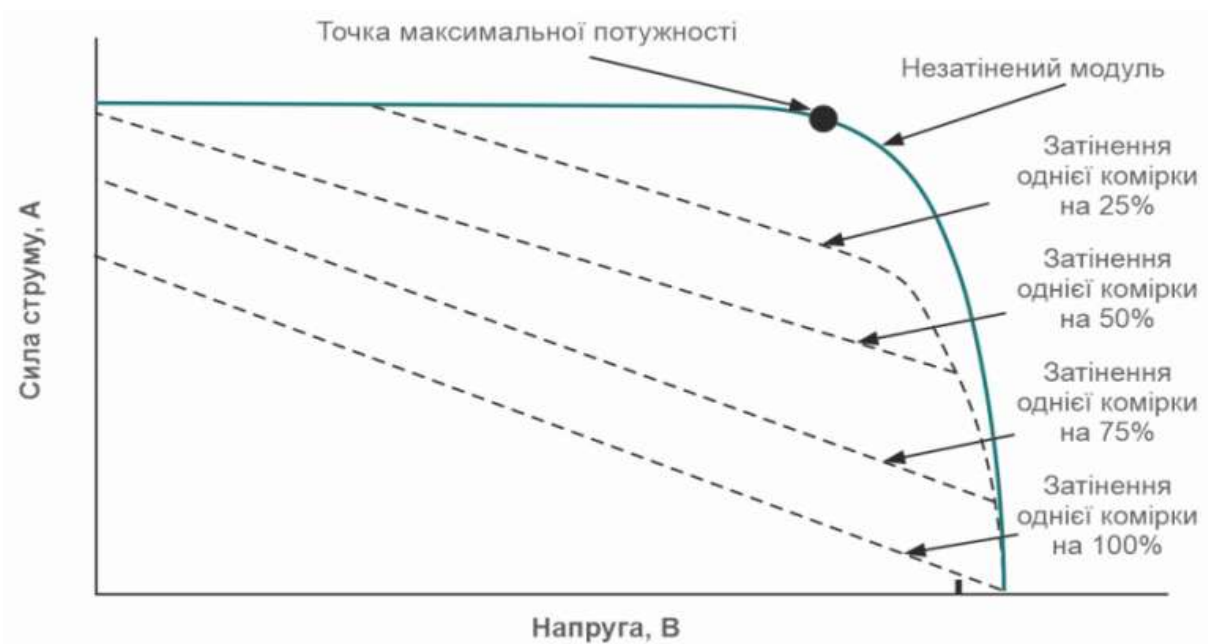


Рис. 2. Залежність вольт-амперної характеристики сонячного модуля від рівня затінення [12]

Отже, як слідує з рис. 2, затінення навіть однієї комірки суттєво впливає на ВАХ сонячного модуля: зменшується напруга і струм, які модуль може видати у навантаження і, відповідно, значно зменшується потужність.

Зазвичай, при проведенні досліджень на цю тему, розглядають різні рівні затінення: повне, часткове, слабе і сильне. Кожен з цих видів затінення має різний вплив на електрогенерацію сонячної батареї. Так, під час повного затінення затінюється вся поверхня сонячної панелі, в результаті відбувається значне падіння генерації електроенергії. Під час часткового затінення

тінь накриває частину поверхні сонячної панелі, в результаті зменшення потужності не значне [3; 5]. Але, у довгостроковій перспективі часткове затінення може мати більш серйозні наслідки, ніж повне, оскільки призводить до швидкого виходу з ладу сонячної панелі внаслідок перегрівання, послаблення контактів між модулями тощо [6]. Для сильної тіні характерні чіткі контури, внаслідок того, що вона утворюється об'єктами, розташованими поблизу сонячної панелі. Слабка тінь характеризується розмитими контурами – вона утворюється від предметів, що знаходяться на

великих відстанях від панелі або у хмарну погоду. Відповідно, це також слід мати на увазі при виборі місця розташування сонячної панелі, адже: під впливом сильної тіні – знижується напруга затемненої сонячної панелі, а під впливом слабкої тіні – знижується сила струму [13].

В сучасних умовах, коли Україна потерпає від численних нападів з боку країни-агресорки, а об'єкти енергетичної галузі є предметом цілеспрямованих атак – підвищену увагу та зацікавленість викликають наукові дослідження, в яких йдеться не лише про вплив тіні, а досліджується робота пошкоджених сонячних панелей.

У цьому контекст, вельми цікавою є праця групи науковців Української інженерно-педагогічної академії, м. Харків [3], в якій

проведено дослідження сонячного елемента площею 25 см^2 , з метою визначення впливу затінення та пошкоджень на його параметри. При проведенні дослідження, науковці перед кожним новим заміром збільшували площу затінення та пошкодження на 1 мм^2 , а потім опрацювали отримані результати. В ході дослідження виявлено відмінність впливу затінення та пошкодження сонячного елемента на величину струму та напруги. Так, затінення викликає стрімкі перепади при досягненні певних розмірів, в той час як пошкодження – характеризується більш прямою залежністю зменшення показників струму та напруги при збільшенні розмірів пошкодження. Зокрема, на рис. 3, 4 представлено залежність струму короткого замикання та напруги холостого ходу від площі затінення.

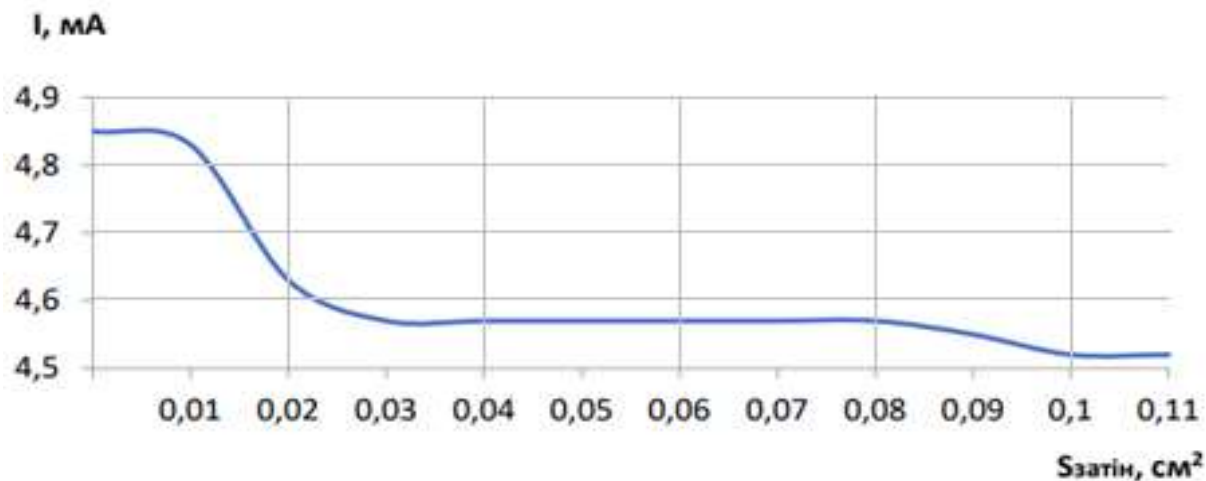
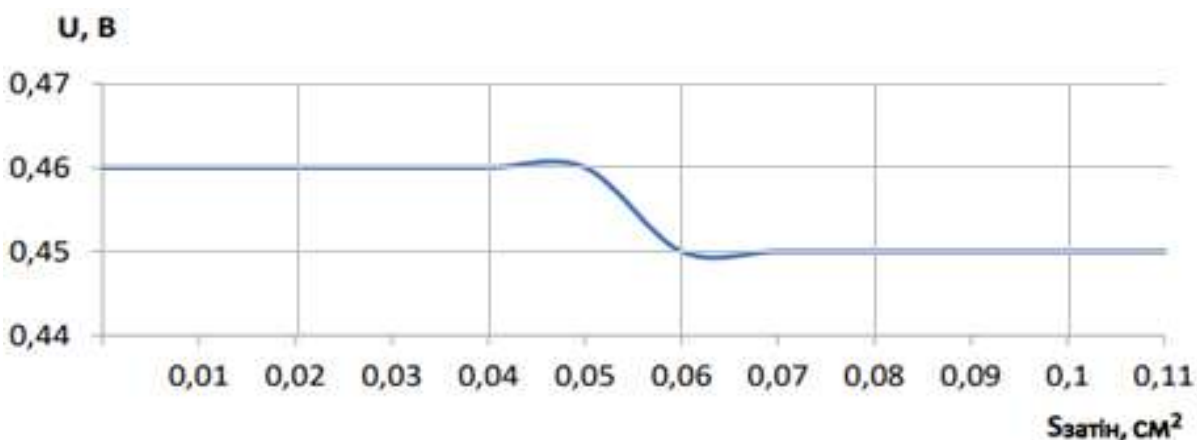


Рис. 3. Залежність струму від площі затінення [3]



Ри. 4. Залежність напруги від площі затінення [3]

Так, за твердженням науковців, при збільшенні площі затінення сонячного елемента з 0,01 до 0,03 см², сила струму різко спадає з 4,85 мА до 4,57 мА., а в подальшому, при збільшенні площі затінення навіть до 0,11 см² – струм спадає лише до рівня 4,52 мА. Отже, як випливає з цих досліджень, під час затінення сонячної панелі значення струму короткого замикання зменшується, а значення напруги холостого – залишається незмінним [3].

У цьому контексті слід відзначити, що дослідження науковців цілком відповідають практиці, заснованій на реальній діяльності вітчизняних компаній, які працюють як в Україні, так й за кордоном [14]. Так, спираючись на багаторічний досвід фахівців, що спеціалізуються на встановленні сонячних панелей, можна констатувати, що затінення та пошкодження елементів сонячних панелей суттєво впливають на їхні параметри, зокрема на струм та напругу, що призводить до значного зниження ефективності виробництва електроенергії. Навіть незначне затінення однієї комірки сонячного модуля може суттєво зменшити його виробничу потужність. Це є особливо критично для систем з послідовним з'єднанням модулів, де затінений модуль може блокувати потік електроенергії у ланцюгу. Для мінімізації негативного впливу затінення важливо оптимізувати розміщення сонячних панелей та використовувати системи слідкування за Сонцем, що дозволяє максимізувати ефективність використання сонячної енергії. Крім того, на нашу думку, особливої уваги набуває питання встановлення захисних споруд для сонячних електростанцій, що стає все більш актуальним, особливо для регіонів з високим ризиком природних катастроф або в зонах проведення бойових дій. Захист сонячних панелей від уламків снарядів, пошкоджень внаслідок граду, сильних вітрів та інших атмосферних явищ – є одним з ключових факторів для забезпечення їх довготривалої ефективної роботи та надійності. Відповідно, додаткові інвестиції в захисні механізми, такі як броньоване скло, спеціальні обрамлення, захисні споруди тощо, можуть не лише значно зменшити ризик пошкодження та збільшити термін служби обладнання, але й у довготривалому періоді – підвищити економічну ефективність та пришвидшити термін окупності всіх інвестицій в рамках проєкту. Використання передових технологій захисту дозволяє також зменшити потребу в частому обслуговуванні та ремонті систем,

забезпечуючи стабільне виробництво електроенергії навіть у складних умовах повоєнного відновлення енергетичної галузі України.

Висновки і перспективи. В роботі проведено аналіз напрацювань вітчизняних науковців в контексті оптимізації розташування сонячних панелей для досягнення їх максимальної виробничої потужності. Так, при аналізі досліджень впливу орієнтації і кута установки сонячних панелей на їх виробничу потужність, встановлено, що використання слідкуючої (трекерної) системи забезпечує на 24% більше генерації електроенергії, ніж стаціонарний варіант установки (з фіксованим кутом) сонячної панелі.

Розглянуто різні рівні затінення сонячних панелей внаслідок впливу різноманітних факторів: повне і часткове, слабе і сильне, та визначено вплив кожного з них на вольт-амперні характеристики сонячного модуля. При аналізі впливу затінення сонячних панелей на їх енергетичні показники, встановлено, що навіть часткове затінення – призводить до значного погіршення енергетичних показників сонячної панелі, а повне – призводить до зменшення потужності сонячної панелі майже у 9 разів.

На підставі одночасного вивчення теоретичних викладок та досвіду практичного застосування, встановлено, що підґрунтям для досягнення максимальної виробничої потужності може стати одночасне використання найкращих досягнень вітчизняних та зарубіжних науковців, у поєднанні з досвідом практичного використання, та за умов одночасного дотримання низки чинників, які найбільше впливають на потужність сонячних електростанцій:

- застосування новітніх матеріалів для виробництва сонячних панелей, які можуть підвищити їх ефективність та забезпечити стійкість до пошкоджень (в першу чергу – перовскітні сонячні елементи, технологія виробництва яких за останнє десятиліття досягла кількох глобальних проривів і продовжує розвиватися й сьогодні);

- використання геоінформаційних систем та розробка систем інтелектуального управління, які мають на меті максимально автоматизувати процес налаштування параметрів сонячних панелей для оптимального виробництва енергії у реальному часі (це може включати врахування рівня сонячної інсоляції в залежності від кліматичних умов регіону, орієнтацію відносно сонця в залежності від

місяця року, кількості сонячних днів, температури навколишнього середовища тощо, аналіз затінення від будівель та рослинності навколо, а також враховувати прогноз погоди та найближчий період – з подальшою обробкою всієї цієї інформації за допомогою штучного інтелекту та, за рахунок застосування адаптивних інноваційних систем кріплення (автоматичні трекери сонячного світла, які можуть додатково оптимізувати виробництво енергії), які дозволяють сонячним панелям змінювати своє положення відносно Сонця протягом дня, автоматично досягати вибору найкращого варіанту кута нахилу сонячних панелей, що може значно підвищити загальну ефективність таких систем);

– інтеграція сонячних електростанцій з іншими відновлюваними джерелами енергії (вітрова), а також їх взаємодія з системами зберігання енергії для забезпечення надійності постачання. Крім того, перспективним напрямом також вбачається використання сонячної енергії при вирощуванні сільськогосподарської продукції, зокрема, в тепличному господарстві, в системах зрошення земель, захисту рослин тощо;

– одночасне дотримання принципів просторового, екологічного та соціально-економічного планування, з метою, аби питання розміщення сонячних електростанцій було інтегровано у загальну концепцію відновлення та розвитку громад і територій, та не мало негативного впливу на місцеві екосистеми, соціальні умови проживання тощо. Дотримання таких норм має мінімізувати негативний вплив на біорізноманіття, а також сприяти розробці стратегій мінімізації потенційного конфлікту за використання землі, доступ до джерел енергії тощо;

– сприяння у соціально-економічному розвитку громад і територій, шляхом створення умов для надання певних вигоди від розгортання сонячних енергетичних проєктів на місцевому рівні (створення додаткових робочих місць, сплата податків, навчання та розвиток персоналу, забезпечення доступу до електроенергії в віддалених або неелектрифікованих регіонах, освітлення таких регіонів у нічний час, сприяння впровадженню енергетичної децентралізації тощо).

Отже, для оптимізації виробітку сонячної енергії, необхідно інтегрувати інноваційні матеріали, передові технології та мати глибоке розуміння природних та соціальних умов. Ефективне поєднання наукових досліджень,

екологічної обачності та багатовекторної співпраці з громадами, на території яких можуть бути побудовані сонячні електростанції – відкриває додаткові можливості на шляху до сталого майбутнього, де енергія Сонця може стати одним з ключових ресурсів.

Крім того, у роботі досліджено питання впливу пошкоджень різних типів на ефективність функціонування сонячних панелей. Визначено, що в сучасних умовах бойових дій на території України внаслідок повномасштабного російського вторгнення, особливої уваги потребує питання захисту сонячних панелей від пошкоджень внаслідок можливих обстрілів, мінно-вибухової хвилі, вражень від уламків снарядів тощо. Впровадження таких заходів дозволить забезпечити більш ефективне функціонування сонячних систем, отримувати максимальну виробничу потужність сонячних панелей та зменшити строк їхньої окупності.

Які саме системи захисту можуть бути найбільш ефективними для застосування у сучасних умовах – відповідь на це питання стане напрямом наших подальших науково-практичних пошуків у цій сфері.

Л і т е р а т у р а

1. Мельник Л.Г., Маценко О.І., Терещенко С.В.. Наукове обґрунтування підвищення техніко-економічної ефективності використання сонячної енергії // *Механізм регулювання економіки*, 2020. №2. DOI: <https://doi.org/10.21272/mer.2020.88.10>
2. Загайнова, О. А., & Сердюкова, Г. М. (2023). Сонячна on-grid електростанція та її приєднання до електричної мережі. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетика: надійність та енергоефективність*, № (2(7)), С. 22-27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.02.11>
3. Кирисов І.Г., Михайлов Б.К., Лосенко Є.В. Вплив затінення та пошкоджень сонячних батарей на їх параметри // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки, Том 34 (73). № 1 2023. С. 180-185. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/27>. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/1_2023/27.pdf
4. Возняк О.Т., Янів М.С. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Львів, 2010. № 664. С. 7–10.

5. Кирисов І., Буданов П. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів // *Машинобудування*. 2022. №. 29. С. 104-117.
6. Li G., Xuan Q., Pei G., Su Y., Ji J. Effect of non-uniform illumination and temperature distribution on concentrating solar cell-a review // *Energy*. 2018. Vol. 144. P. 1119-1136.
7. Як збільшити продуктивність сонячної електростанції? Технічні рішення/ Економіка/ Практичний досвід. Частина 1. Сонячні системи: веб-сайт. URL: <https://solarsystem.com.ua/yak-zbilshyty-produktyvnist-sonyachnoyi-elektrostantsiyi-tehnichni-rishennya-ekonomika-praktychnyi-dosvid/>
8. Лекції: Запорізький національний університет: офіційний веб-сайт. URL: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1087006/mod_resource/content/1/%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%97.pdf
9. Методика розрахунку сонячної електростанції: веб-сайт. URL: <https://www.solargarden.com.ua/metodyka-rozrahunku-sonyachnoi-elektrostantsii-ses/>
10. Хотян А.А., Розен В.П., Чермалих О.В. Аналіз ефективності використання фотоелектричних модулів // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 4. С. 14-19.
11. Основні параметри сонячних панелей. Кворум: веб-сайт. URL: <https://kworum.com.ua/osnovni-parametri-sonjachnih-panalej>.
12. Вплив тіні на роботу сонячних батарей. SolarSoul.net: веб-сайт. URL: <https://solarsoul.net/uk/vpliv-tini-na-robotu-sonyachnix-batarej>
13. Лисенко Л. І., Махотіло К. В., Косатий Д. М. Фактори впливу на ефективність сонячних колекторів та фотоелектричних панелей в Харківській області // *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2013. № 59 (1032). С. 101-111.
14. Sun Street is a US-based holding company specialized in the consolidation of three key divisions: European windows and doors, solar panel installation, and kitchen furniture: official website. URL: <https://sunstreetusa.com/>
3. Kyrysov I.H., Mykhailov B.K., Losenko Ye.V. (2023). Vplyv zatinennia ta poshkodzen soniachnykh batarei na yikh parametry // *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho*. Seria: Tekhnichni nauky, T. 34 (73) № 1. S. 180-185. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/27>. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/1_2023/27.pdf (in Ukrainian).
4. Voznyak, O.T. and Yaniv, M.E. (), “Energetic potential of energy and energy prospects in Ukraine”, *Visnik Natsionalnogo universitetu «Lvivska politehnika»*, 2010 Lviv. № 664. S. 7–10.
5. Kyrysov I., Budanov P. Metody doslidzhen pohlynaiuchoi poverkhni soniachnykh elementiv // *Mashynobuduvannia*. 2022. №. 29. S. 104-117.
6. Li G., Xuan Q., Pei G., Su Y., Ji J. Effect of non-uniform illumination and temperature distribution on concentrating solar cell-a review // *Energy*. 2018. Vol. 144. P. 1119-1136.
7. Як збільшити продуктивність сонячної електростанції? Технічні рішення/ Економіка/ Практичний досвід. Частина 1. «Сонячні системи». URL: <https://solarsystem.com.ua/yak-zbilshyty-produktyvnist-sonyachnoyi-elektrostantsiyi-tehnichni-rishennya-ekonomika-praktychnyi-dosvid/>
8. Лекції: Запорізький національний університет: офіційний веб-сайт. URL: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1087006/mod_resource/content/1/%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%97.pdf
9. Методика розрахунку сонячної електростанції (SES) URL: <https://www.solargarden.com.ua/metodyka-rozrahunku-sonyachnoi-elektrostantsii-ses/>
10. Khotian A.A., Rozen V.P., Chermalykh O.V. Analiz efektyvnosti vykorystannia fotoelektrychnykh moduliv // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 4 – S. 14-19.
11. Основні параметри сонячних панелей : [Basic parameters of solar panels] // *Кворум*. – URL: <https://kworum.com.ua/osnovni-parametri-sonjachnih-panalej>.
12. Вплив тіні на роботу сонячних батарей [The influence of the shadow on the operation of solar batteries]. SolarSoul.net. URL: <https://solarsoul.net/uk/vpliv-tini-na-robotu-sonyachnix-batarej>.
13. Lysenko L. I., Makhotilo K. V., Kosaty D. M. (2013). Faktory vplyvu na efektyvnist soniachnykh kolektoriv ta fotoelektrychnykh panelei v Kharkivskii oblasti [Factors affecting the efficiency of solar collectors and photovoltaic panels in the Kharkiv region] // *Visnyk NTU «KhPI»*. № 59 (1032). S. 101-111.

References

1. Melnyk L.H., Matsenko O.I., Tereshchenko S.V.. Naukove obgruntuvannia pidvyshchennia tekhniko-ekonomichnoi efektyvnosti vykorystannia soniachnoi enerhii // *Mekhanizm rehulivannia ekonomiky*, 2020. №2. DOI: <https://doi.org/10.21272/mer.2020.88.10>
2. Zagajnova O.A., Serdjukova O.A. Soniachna on-grid elektrostanciya ta ii pruednannja do elektruchnoj merezi. *Visnyk Nacionaljnogo technichnogo universiteta «KhPI». Series: Energetika: nadijnistj ta energoefektivnistj*. 2023. №2(7), S.22-27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2023.02.11>

14. Sun Street is a US-based holding company specialized in the consolidation of three key divisions: European windows and doors, solar panel installation, and kitchen furniture. Official website. URL: <https://sunstreetusa.com/>

Rychka R. Yu. Optimization of solar panel placement for maximum production capacity

Solar energy, as one of the clean and renewable resources, holds significant potential to meet the growing global demand for energy and to reduce the negative impact on the environment. This article explores methods to enhance the efficiency of solar energy production, emphasizing that despite the increasing focus on solar energy in scientific research and its substantial potential for development in Ukraine, this issue remains insufficiently explored and studied. Moreover, the relevance of this topic is substantiated in the context of the need for rapid and high-quality restoration of critical infrastructure damage due to Russia's invasion of Ukraine. The article provides a comprehensive review of existing approaches to studying factors affecting the efficiency of solar panels, such as the angle of incidence of sunlight, the quality of materials for manufacturing panels, uniformity of illumination, level of atmospheric pollution, etc. The research supports the hypothesis that optimal performance of solar panels is achieved under conditions where sunlight falls perpendicularly to the panel, in the absence of shading or dirt on their surface. The study offers experimental proposals to support the use of tracking systems to maximize the efficiency of solar

panels by adjusting the angle of inclination of the panels throughout the day. Additionally, the research examines two main strategies for reducing the cost of solar electricity production: reducing the cost of solar modules and increasing the efficiency of energy collection. Moreover, the negative effect of shading on panels and its impact on technical and economic indicators is investigated, revealing that even partial shading can lead to a significant decrease in the efficiency of a solar power plant. The work concludes that the implementation of tracking systems not only increases the productivity of solar power plants but also shortens the payback period of investments in their construction. This research aims to support the ongoing discussion on the use of renewable energy sources, offering viable solutions for enhancing the efficiency of solar energy systems by optimizing the placement of solar panels for their maximum productivity, which is critically important for ensuring sustainable development and energy security.

Keywords: solar panels, location optimization, production capacity, solar energy, shadow analysis, renewable energy sources, monitoring technologies.

Ричка Роман Юрійович – спеціаліст з фінансів, економіст, магістр права, юрист, засновник ТОВ «САН СТРИТ ГРУП», ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1860-4221>

Стаття подана 15.01.2014.