

НАКАШИДЗЕ ЛІЛІЯ

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
<https://orcid.org/0000-0003-3990-6718>
e-mail: foton_dnu@ukr.net

ГІЛЬОРМЕ ТЕТЯНА

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
<https://orcid.org/0000-0002-9598-6532>
e-mail: gillyorme@i.ua

ВПЛИВ СПОСОБУ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОГЕНЕРУВАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ

В даний час розроблено сонячні елементи різних типів, призначені для функціонування в різних умовах. При цьому важливим є зниження вартості електричної енергії, одержуваної за допомогою фотоелектричного перетворення енергії сонця. Для вирішення питання ефективності функціонування сонячних батарей і як результат, низька вартість отриманої електричної енергії, необхідно на етапі конструкторських розробок проведення оптимізації архітектури побудови сонячної батареї.

Метою роботи є визначення впливу способу оцінювання енергогенерувальної ефективності різних типів сонячних елементів на експлуатаційні характеристики сонячної батареї. Проведено аналіз аналітичної моделі способу оцінювання енергогенерувальної ефективності різних типів сонячних елементів на експлуатаційні характеристики сонячної батареї. Розглянуто підхід, який базується на отриманні експериментальних даних при натурних випробуваннях. Проведення порівняння експлуатаційних характеристик сонячних елементів, отриманих аналітичним та експериментальним методами.

Показано, що експлуатаційні характеристики мають декілька чинників. Серед них тип використаних сонячних елементів, метод попереднього оцінювання енергогенерувальної їх ефективності. Дані отримані завдяки автоматизованому вимірному комплексу, тобто на підставі експериментальних даних, дозволяють побудувати поліноміальні залежності. Такий комбінований підхід дозволить з більшою точністю визначити геометричні параметри сонячних батарей при різному рівні енергетичної освітленості. Використання отриманих результатів вплине на зменшення масогабаритних показників сонячних батарей та дозволить суттєво зменшити вартість отриманої електричної енергії.

Ключові слова: сонячна батарея, генерована енергія, гаряча пляма, надійність, термін експлуатації, технічна безпека.

NAKASHYDZE LILIYA, HILORME TETIANA
Oles Honchar Dnipro National University

INFLUENCE OF THE ESTIMATION METHOD OF ENERGY-GENERATING EFFICIENCY OF SOLAR CELLS ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF THE SOLAR PANEL

Currently, solar cells of various types have been developed to operate in different conditions. Preliminary determination of the power generating capacity of solar cells and solar panels is necessary to predict balanced power generation and meet the needs of consumers. Experimental determination of the preliminary operational characteristics of a solar power installation allows solving the problem of uneven energy production. That is, to predict the performance characteristics of solar cells, i.e. the dependence on external factors such as temperature, light level, power surges, etc. Among these factors, the level of illumination is particularly important, since it determines the amount of electricity that a solar cell can generate (the level of generation of the predicted power). It is important to confirm the theoretical calculations that are possible when forming solar panels and pre-selecting solar cells. To address the issue of the efficiency of solar cells and, as a result, the low cost of the generated electricity, it is necessary to optimize the architecture of the solar cell at the design development stage. The following approaches can be used to solve this issue: based on experimental data; based on the construction of an analytical model.

The aim of the study is to determine the influence of the method for assessing the energy-generating efficiency of different types of solar cells on the performance characteristics of a solar panel. An analysis of the analytical model of the method for assessing the energy-generating efficiency of different types of solar cells on the performance characteristics of the solar panel was carried out. The approach based on obtaining experimental data during field tests is considered.

The performance characteristics of solar cells obtained by analytical and experimental methods are compared. The results obtained on the basis of the above approaches were compared. A comparison of the performance characteristics of solar cells based on solar cells of such types as metal-dielectric-semiconductor with a thin base region, metal-dielectric-semiconductor with a thick base region, and metal-dielectric-semiconductor. It is shown that several factors influence the performance characteristics. Among them are the type of used solar cells and the method of preliminary assessment of their energy-generating efficiency.

The data obtained through an automated measuring complex, i.e. on the basis of experimental data, allow us to build polynomial dependencies. This combined approach will allow us to determine the geometric parameters of solar panels with greater accuracy at different levels of energy illumination. The obtained dependencies allow us to calculate the geometric parameters of solar cells for different levels of energy illumination. The dependencies also allow for a comparative analysis of the energy and weight and size parameters of a solar cell (taking into account the type of solar cells used), which are based on such calculations. The use of the obtained results will reduce the weight and dimensions of solar cells, and will significantly reduce the cost of electricity.

Keywords: solar panel, generated energy, hot spot, reliability, service life, technical safety.

Постановка проблеми

Використання відновлюваних джерел енергії, насамперед сонячної, є одним із багатьох шляхів

вирішення проблеми отримання екологічно чистої та, в перспективі, економічно вигідної енергії. Однак існує комплекс проблем, що перешкоджають широкомасштабному впровадженню фотоелектричного перетворення, головною з яких є досить висока вартість та технічна вразливість (залежність від природних та технічних факторів) сонячних батарей. В даний час розроблено велику кількість сонячних елементів різних типів. Розроблені сонячні елементи для різних рівнів освітленості, різних температурних режимів, все це необхідно врахувати при розробці алгоритму функціонування. Зниження вартості електричної енергії, одержуваної за допомогою фотоелектричного перетворення, намагаються досягти кількома способами: мінімізацією та здешевленням технологічних процесів при створенні сонячних елементів, зниженням вартості вихідної сировини, застосуванням концентрації сонячного випромінювання, використанням засобів захисту від електричного перенавантаження та перегріву, оптимізація вихідних параметрів та ін.

Існує безліч видів сонячних елементів, призначених працювати в різних кліматичних умовах. Також винаходять нові матеріали для створення сонячних елементів і вдосконалюються способи їх захисту від електричного та теплового навантаження. Тому автоматизація дослідження функціонування сонячних елементів протягом тривалого часу залишається актуальною.

Аналіз досліджень та публікацій

Попереднє автоматизоване вимірювання сонячних елементів та сонячних батарей необхідне для прогнозування збалансованій виробіток електроенергії, закриття потреб споживачів. Експериментальне визначення попередніх експлуатаційних характеристик сонячної енергоустановки дозволяє вирішити проблему в нерівномірному виробітку енергії. Тобто спрогнозувати експлуатаційні характеристики сонячних елементів, тобто залежність від зовнішніх факторів, таких як температура, рівень освітленості, перенапруг в електричній мережі тощо. Серед цих факторів особливо виділяється рівень освітленості, оскільки саме від цього залежить кількість електроенергії яку може виробити сонячний елемент (рівень генерування прогнозованої потужності) [1-7]. Важливим є підтвердження теоретичних розрахунків, які можливі при формуванні сонячних батарей та попередньому виборі сонячних елементів.

В статті [8] розглянуто принцип моделювання вольт-амперної характеристики сонячних елементів. Особливістю є те, що враховується параметри сонячних елементів у реальних умовах експлуатації за різних умов освітленості. Ці характеристики отримуються при автоматизованих вимірюваннях і можуть істотно відрізнитися від паспортних параметрів, що визначаються виробником у стандартних тестових умовах (Standard Test Conditions, STC). Цей факт повинен враховуватися при побудові адекватних моделей для компонентів фото – електронних систем, які працюють за зовнішніх умов, що змінюються, а також при вирішенні завдань прогнозування виробництва електроенергії.

Основні параметри сонячних елементів: точки максимальної потужності та опору втрат можуть досить точно визначитися з вольт-амперною характеристикою сонячних елементів, промодельованих за допомогою апроксимуючих функцій, за експериментальними даними, отриманими в польових умовах [8].

Характерні точки, для яких зазвичай наводяться виробниками паспортні дані: напруга холостого ходу, струм короткого замикання та точка максимальної потужності. Ці точки залежать від зовнішніх параметрів: інтенсивність радіації впливає на величину вихідного струму, а температура на вихідну напругу сонячного елемента [8]. В цій статті наведено базові характеристики для побудови вольт-амперної характеристики сонячних елементів, проте процес проведення експерименту майже не описаний, а важливий етап у процесі аналізу впливу затемнення на роботу сонячних батарей не розглянутий.

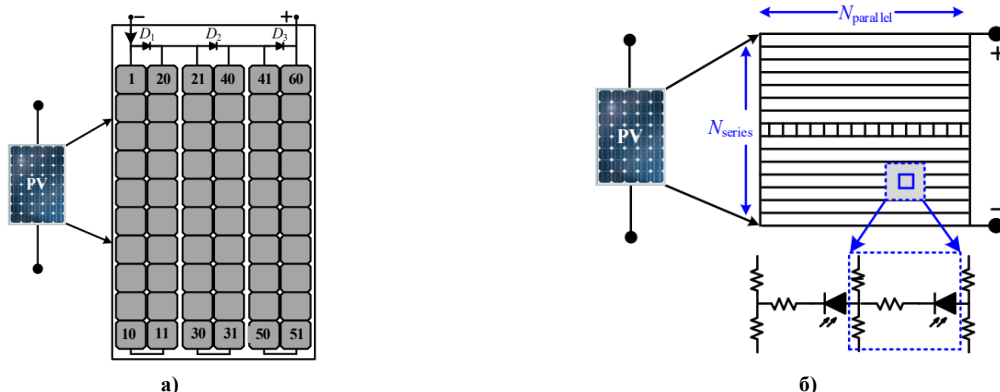


Рис. 1. Внутрішня структура сонячних модулів: (а) кристалічний кремній і (б) тонка плівка, обхідні діоди D1, D2 і D3

Примітка: PV – сонячна батарея; $N_{parallel}$ – паралельно з'єднані сонячні елементи; N_{series} – послідовно з'єднані сонячні елементи.
Джерело: систематизовано авторками на основі [9]

В статті [9] наведено ґрунтовний аналіз впливу ефекту затінення на роботу сонячних батарей. Ефект часткового затінення відрізняється для полікристалічних кремнієвих та тонкоплівкових сонячних елементів, через їх відмінну внутрішню структуру. Як правило, сонячні батареї з полікристалічного кремнію мають 60-72

сонячних елементів в серії, як показано на рис. 1(а). Кожна комірка веде себе як окреме джерело постійного струму. Під час часткового затінення вихідна потужність серії затемнених сонячних елементів змінюється, та знижується. Затінені комірки починають діяти як навантаження та розсіюють додаткову потужність, що генерується незатіненими, послідовно з'єднаними сонячними елементами. Щоб обмежити це, обхідні діоди підключаються до 20-24 серійних сонячних елементів, як показано на рис. 1. Зворотна напруга на затінених комірках обмежується обхідними діодами D1, D2 і D3, щоб привести її до безпечного рівня.

На відмінно від цього, тонкоплівкові сонячні батареї мають довгі, вузькі та прямокутні комірки з двовимірною структурою потоку струму. Ці комірки в тонкоплівкових сонячних батареях з'єднані послідовно, як показано на рис. 1(б). У тонкоплівковій сонячній батареї в кожній комірці присутні кілька сонячних елементів, які додатково з'єднані паралельно та представлені $N_{parallel}$, як показано на рис. 1(б) [9].

У статті [9] було досліджено вплив часткового затінення на дві технології сонячних батарей, тобто тонкоплівкову та полікристалічного кремнію. Результати показали, що розроблені сценарії часткового затінення впливають на обидві технології. Загалом сонячна батарея полікристалічного кремнію зазнає значного впливу через споживання електроенергії, виробленої незатіненими сонячними елементами. Отже, такі елементи створюють більше навантажень, що, у свою чергу, впливає на загальний термін служби та продуктивність сонячної батареї з полікристалічного кремнію, в порівнянні з тонкоплівковою сонячною батареєю.

Визначення оптимальних параметрів навантаження сонячних батарей, далі чітко окреслено вимоги виконання яких сприяє вимогам ефективної роботи сонячних батарей.

1. Для забезпечення поглинання максимально можливої кількості енергії випромінювання, що потрапляє на сонячні елементи, оптичний коефіцієнт поглинання фотоелектричного шару повинен бути близьким до одиниці.

2. Фотогенеровані носії повинні ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін фотоелектричного шару, що містить р-п-перехід.

3. Сонячний елемент повинен мати оптимальну висоту бар'єра в р-п-переході, достатню для забезпечення високого значення напруги холостого ходу U_{xx} , але не дуже велику. Це необхідно для того, щоб запобігати поглинанню фотонів сонячного спектра.

4. Повний опір зовнішнього кола, включеного послідовно з сонячних елементів, має відповідати критерію передачі максимальної потужності в навантаження, тобто бути рівним опору самого сонячного елемента [10].

Перші три пункти залежать від виробника конкретної сонячної батареї та не залежать від споживача. Виконання четвертого пункту цілком та повністю залежить від користувача (завдання програмно-апаратних засобів, що контролюють навантаження та характеристики роботи сонячних батарей під час їх експлуатації).

Отже при автоматизованому вимірюванні доцільно розглянути як зовнішнє навантаження сонячних батарей повинне змінюватися в залежності від умов експлуатації а саме: інтенсивності сонячного освітлення, кута нахилу панелі, температури нагріву робочої сонячної батареї панелі тощо.

Якщо досліджувані типи сонячних батарей складати в системи з відповідним послідовно-паралельним з'єднанням, то потрібно визначати внутрішній опір системи сонячних батарей. Тоді навантаження, що підключається до такої системи, повинно відповідати критерію передачі максимальної потужності й розраховуватись з урахуванням того, що одна монокристалічна сонячна батарея має внутрішній опір 3,34 Ом, а полікристалічна – 3,04 Ом [10]. Також слід зазначити, що на ефективність роботи сонячної батареї впливає її нагрівання, тобто чим вищою є температура поверхні сонячної батареї, тим меншою – її ефективність.

Величина електроенергії, що виробляється сонячними електростанціями значною мірою залежить від того, наскільки оптимальною є конфігурація розташування рядів сонячних батарей. Для підвищення рівня генерації батареї повинні встановлюватись під певними кутами нахилу та азимуту. Оптимальні нахил та азимут панелей вибираються з умови максимуму сонячної радіації, що надходить на одиницю площі приймальної поверхні за календарний період роботи станції. На сонячних електростанціях великої потужності ряди модулів мають, як правило, азимутальний напрямок приймальної поверхні на південь і розміщуються на вільній земельній ділянці, на якій відсутні великі затіняючі об'єкти. Однак залишається проблема часткового затінення сусідніми рядами модулів у години, коли кут висоти Сонця не дуже великий. При частковому затіненні змінюється розташування точки максимальної потужності на вольт – амперній характеристиці, а також з'являються додаткові максимуми на кривій «потужність-напруження-навантаження», що утруднює роботу алгоритмів MPPT (Maximum Power Point Tracking) інверторів [11]. Але основним негативним наслідком часткового затінення є падіння вихідної потужності затінених рядів батарей.

На етапі проектування СЕС обов'язково має проводитися аналіз впливу часткового затінення на добуве вироблення енергії сонячною електростанцією. Такий аналіз виконується шляхом моделювання можливих змін конфігурації тіні на сонячному модулі та відповідно вихідної потужності станції [11].

Освітленість в області тіні є неоднорідною: вона вище поблизу краю тіні, на відмінно від ділянки яка знаходиться далі від краю. Цю неоднорідність слід було б враховувати при моделюванні впливу затінення на потужність сонячної батареї. Однак, значення пари величин (I , V) вольт-амперної характеристики визначається саме найменш освітленим ділянкою в області тіні. Тому при розрахунках тін вважається однорідною, а інтенсивність радіації в області тіні, дорівнює мінімальному значенню на всій

площі затінення сонячного модуля [11]. Дослідження проводилися в НТУУ «Київський політехнічний інститут». Азимут нормалі до поверхні досліджуваних сонячних модулів був спрямований на південь, а кут нахилу модулів дорівнює 35° . Цей кут нахилу, як показано в наступному розділі статті, є оптимальним для київського регіону [11].

Профіль сонячної радіації, який необхідний для визначення кутів нахилу панелей, являє собою дані про добове надходження сонячної радіації на приймальну поверхню. Повна сонячна радіація може бути обчислена через пряму і дифузну радіацію на горизонтальній поверхні, для визначення яких використовують дані метеостанцій, які розташовані по всьому світі. Щоб отримувати такі дані для районів, які віддалені від метеостанцій, застосовують наближення, що ґрунтуються на інтерполяції. Неминучі наближення і при визначенні відбитої компоненти радіації, яка залежить від відбивної здатності земної поверхні та ландшафту, що оточує станцію. Вимірювання коефіцієнтів відображення повинні проводитися в точці розташування станції, що в більшості випадків важко реалізувати. Зазначимо, залежність ефективності сонячних модулів від спектрального складу сонячної радіації, який визначається не тільки джерелом випромінювання, але й складом атмосфери. Дані про спектр сонячного випромінювання, що пройшло, є ще менш повними, ніж дані про інтенсивність радіаційних компонентів. Таким чином, точне визначення характеристик сонячної радіації в довільно заданій точці не є можливим, мова може йти лише про наближені моделі з емпіричними параметрами [11, 12].

Ефективна робота сонячних енергоустановок залежить від багатьох факторів: куту нахилу сонячних батарей, сезону року, географічного місця розташування станції, погодних умов. Затінення сонячних елементів, значною мірою впливає на ефективність експлуатації сонячної електростанції, бо саме від фізичних процесів, які виникають при цьому залежить кількість електроенергії яку здатна виробити сонячна електростанція. При розрахунку сонячної енергоустановки важливими етапами є розрахунок кута падіння сонячного випромінювання для статичних систем, географічне місце розташування впливає на період року коли доцільно і вигідно використовувати СЕС, а також від місця розташування, а саме від навколишніх об'єктів, може утворюватися тінь, яка буде знижувати роботу СЕС. Слід зазначити, що тінь відкидають і самі сонячні батареї, тому при проектуванні СЕС слід враховувати вплив взаємного затінення рядами сонячних батарей, правильно розрахована відстань між сонячними батареями дозволить збільшити ефективність роботи сонячної станції при однакових витратах, але без розрахунку ефекту затінення. Тому доцільним є розгляд теоретичних відомостей про вплив затінення, та врахування результатів проведених експериментальних досліджень з визначення впливу різних видів затінення на ефективність монокристалічних сонячних батарей.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення впливу способу оцінювання енергогенерувальної ефективності різних типів сонячних елементів на експлуатаційні характеристики сонячної батареї.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Аналіз аналітичної моделі способу оцінювання енергогенерувальної ефективності різних типів сонячних елементів на експлуатаційні характеристики сонячної батареї.
2. Розглянути підхід, який базується на отриманні експериментальних даних при натурних випробуваннях.
3. Проведення порівняння експлуатаційних характеристик сонячних елементів отриманих аналітичним та експериментальним методами.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення питання ефективності функціонування сонячних батарей і як результат, вартість отриманої електричної енергії, необхідно на етапі конструкторських розробок проведення оптимізації архітектури побудови сонячної батареї.

Для вирішення цього питання можливе використання наступних підходів: на базі експериментальних даних та на базі побудови аналітичної моделі.

Було проведено порівняння результатів отриманих на базі використаних вище вказаних підходів.

Вихідними даними для проведення порівняння є такі чинники як енергогенеруюча спроможність сонячних елементів (основа конструкції сонячної батареї) та особливості функціонування сонячних елементів. Однак споживача цікавить не тільки генерована енергія відносно окремо розглянутого сонячного елемента, а загальні параметри сонячної батареї. Тобто її енергетичні, масогабаритні, геометричні параметри, які і формують її архітектуру, склад та енергоефективність в цілому.

При цьому необхідно враховувати те, що при розгляді енергоефективності функціонування сонячної батареї не можна масштабно переносити дані про енергетичні параметри сонячних елементів. Це пов'язано з наявністю в сонячних батареях різних втрат, причини яких – комутація сонячних елементів, їх не ідентичність, нерівномірність температурного поля та освітленості та ін. Врахування цих факторів при проектуванні сонячної батареї можливо проводити такими методами:

– введенням в модель відповідних коефіцієнтів [4]. Однак пряме введення корегуючих коефіцієнтів в значній мірі ідеалізує схему комутації сонячних елементів в сонячній батареї.

– побудовою регресійної математичної моделі, де схемні втрати враховуються інтегрально [14]. Це виконується за допомогою методу регресивного аналізу шляхом обробки результатів експериментів (широкий діапазон рівня освітленості та температур). При використанні для розрахунку енергетичних параметрів сонячних елементів регресійної математичних моделі враховуються схемні втрати потужності (комутаційні, від не ідентичності сонячних елементів, від температурних нерівномірностей, часткових затінь та ін) незалежно від реалізації тої чи іншої схеми комутації сонячних елементів в сонячній батареї.

Існують наступні підходи для визначення енергогенеруючої спроможності сонячного елемента (основа конструкції сонячної батареї).

1) Аналітичний підхід, який дозволяє отримати дані про енергетичні параметри тільки характеристичних (крайніх) точок, які характеризують струм сонячного елемента (I_{CE}) та напругу сонячного елемента (U_{CE}), за яких: потужність сонячного елемента максимальна $U_{CE}=U_{opt}$, $I_{CE}=I_{opt}$ / виконується наступна умова $U_{CE}=0$; $I_{CE}=I_{kz}$ / при $U_{CE}=U_{xx}$; $I_{CE}=0$.

В цьому випадку можлива побудова регресійної математичної моделі сонячної батареї, яка базується, в даному випадку, на основному рівнянні сонячного елемента:

$$I_n = I_{\phi} - I_{o,n} \left\{ \exp \left[\frac{e(V + I_n R_n)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V}{R_w} \quad (1)$$

Після цілого ряду математичних перетворень можливо отримати вираз, який дозволяє провести розрахунок енергетичних параметрів сонячної батареї. Це рівняння включає основні енергетичні параметри сонячної батареї, такі як струм короткого замикання, напруга холостого ходу. Відповідно з методикою, що в [4] має вигляд:

$$I_{cb} = I_{kz} - I_{kz} \frac{U}{U_{xx}} \exp(k \cdot (U - U_{xx})) \quad (2)$$

З врахуванням цих залежностей розрахунок енергетичних параметрів сонячної батареї [4] проводиться виходячи з наступного математичного виразу:

$$I_{CB} = I_{kz}^{CB} \cdot \left\{ 1 - \frac{U_{CB}}{U_{xx}^{CB}} \exp \left[\frac{\ln \left(\left(1 - \frac{I_{CB}^{CB}}{I_{kz}^{CB}} \right) \cdot \frac{U_{xx}^{CB}}{U_{opt}^{CB}} \right) \cdot (U_{CB} - U_{xx}^{CB})}{U_{opt}^{CB} - U_{xx}^{CB}} \right] \right\} \quad (3)$$

де I_{CB} – струм, який генерується сонячною батареєю;

I_{kz}^{CB} – струм короткого замикання який генерується сонячною батареєю;

U_{CB} – напруга сонячної батареї;

U_{xx}^{CB} – напруга холостого ходу сонячної батареї;

U_{opt}^{CB} – оптимальна напруга сонячної батареї;

I_{opt}^{CB} – оптимальний струм сонячної батареї.

2) Підхід, який базується на тому, що експериментальним та комбіновано з розрахунковим шляхом може бути отримано великий масив дискретних даних, який дозволяє оцінювати енергогенеруючу спроможність сонячних елементів [15]. На базі цих даних можна скласти емпіричну залежність, яка характеризує енергетичні параметри сонячної батареї.

При виконанні даного дослідження експериментальним та розрахунковими методами було отримано великий масив даних, який дозволив з великою точністю охарактеризувати енергогенерувальну спроможність наступних сонячних елементів: структура напівпровідник-діелектрик-напівпровідник (НДН-структура) з тонкою базовою областю; НДН-структура з товстою базовою областю; структура метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структура).

Для виконання натурних вимірювань була створена експериментальна вимірювальна установка.

Експериментальна установка (рис. 1) складається з наступних основних частин: встановлення стеження за Сонцем, поворотної платформи із сонячними елементами, нерухомої платформи із сонячними елементами, несучої рами; блоку вимірів (комутатор груп, мультиплексор, підсилювачі-перетворювачі); каналу передачі; аналого-цифрових перетворювачів; модуля сполучення; ЕОМ. Застосування ЕОМ дозволяє суттєво розширити можливості експериментальної установки – підвищується точність стеження за Сонцем, змінювати навантаження групи сонячних елементів тощо.

Установка стеження за Сонцем складається з рами з поворотною платформою, блоку живлення та керування, апаратури що записує. Рама є звареною трубчастою конструкцією, у верхній частині якої укріплена поворотна платформа з двома ступенями свободи, що забезпечують перпендикулярність площини сонячних елементів до джерела світла (Сонцю) і стеження за ним.

Платформа складається з основи, закріпленої болтами на рамі. Основа має два підшипникові вузли з горизонтальною віссю обертання [16]. У них встановлений та обертається корпус, на якому розміщений двигун РД-09 з блоком редукторів. На вихідному валу блоку редукторів закріплений через муфту з фрикційними шайбами спеціальний тримач з сонячними елементами, що досліджуються. Привід забезпечує обертання тримача із сонячними елементами зі швидкістю один оберт за 24 години. Корпус встановлюється

та фіксується на кут відміни Сонця по конусу на основі платформи. Утримувач із сонячними елементами, до включення приводу обертання, за допомогою фотодіода або компаса та тимчасової шкали встановлюється строго перпендикулярно до світлового (сонячного) потоку і, при включенні приводу, слідує за світловим потоком. У корпусі розміщено плату індикації орієнтації для встановлення тримача сонячними елементами на джерело світла.

Вимірвальна частина експериментальної вимірвальної установки функціонує в такий спосіб. Дві групи сонячних елементів (CE1...CEn) з подібними характеристиками, що мають у своєму складі фотоелементи розміщені як на поворотній так і на неповоротній платформах. По черзі через комутатор групи підключаються до мультиплексора (М). У кожній із груп частина сонячних елементів підключена до модуля змінних навантажень, решта до модуля постійних навантажень, крім того, окремі сонячні елементи оснащені концентраторами сонячного випромінювання. Мультиплексор підключає підсилювачі-перетворювачі (ПП1...ПП4) до досліджуваних сонячних елементів. Далі сигнал надходить на входи аналого-цифрових перетворювачів каналом передачі даних - несиметричної лінії сигналів постійного струму 0-5 mA довжиною близько 40 м. Роботою мультиплексора через модуль сполучення керує ЕОМ. Оскільки в описуваній експериментальній установці в якості аналого-цифрових перетворювачів використовувалися вольтметри універсальні типу В7-21 (В7-21А, В7-23 і подібні) виникла необхідність створення спеціального модуля сполучення (МС) і написання відповідного програмного забезпечення інтерфейсу.

Більш детально методологія та інструментарій вимірювання представлені в роботі [5].

В результаті проведено співставлення експериментальних та розрахункових даних про енергогенеруючу спроможність сонячних елементів. Ці дані отримані в широкому діапазоні освітленості та температури. Наявність таких показників дозволила встановити точність розрахункових показників та прогнозувати залежність параметрів сонячних батарей від умов експлуатації.

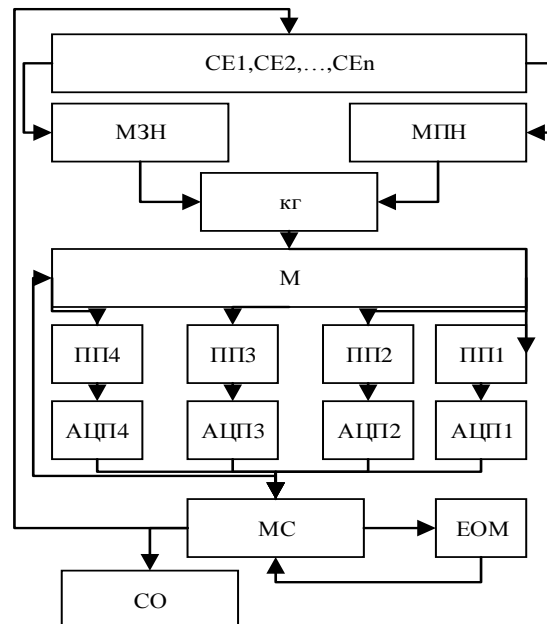


Рис. 2. Гістограма розподілу вихідних даних моделі в інтервалах частот

Джерело: систематизовано авторками на основі [16]

Примітка: АЦП – аналогово-цифровий перетворювач, ЕОМ – електронно-обчислювальна машина, МС – модуль сполучення, МПН – модуль постійних навантажень, МЗН – модуль змінних навантажень, СО – система орієнтації, ПП – підсилювач-перетворювач, КГ – комутатор груп, М – мультиплексор.

Для розрахунку геометричних експлуатаційних параметрів сонячних батарей при врахуванні енергетичних характеристик сонячних елементів, використовувалися методики представлені в [6]. Відповідно даної методики розрахунок геометричних розмірів сонячних батарей проводився з розрахунку на ідентичну енергогенеруючу спроможність об'єктів дослідження. Були розраховані геометричні параметри сонячних батарей, які можуть забезпечити необхідну потужність при різному рівні освітленості. На базі отриманих даних були побудовані графічні залежності, які характеризують динаміку зміни геометричних параметрів сонячних батарей при збільшенні рівня освітленості.

При проведенні співставлення отриманих розрахункових та експериментальних показників енергогенерувальної спроможності сонячних елементів, що були проаналізовані отримані поліноміальні залежності. Побудувати такі залежності можливо на основі використання експериментальних даних. Тобто комбіноване використання аналітичного методу та експериментального автоматизованого вимірювання дозволить розширити можливості цих методів [17, 18]. Отримані математичні залежності з емпірично визначеними коефіцієнтами дозволяють розрахувати параметри сонячних батарей, що проектується з певним типом сонячних елементів, при широкому діапазоні освітленості та температурного впливу.

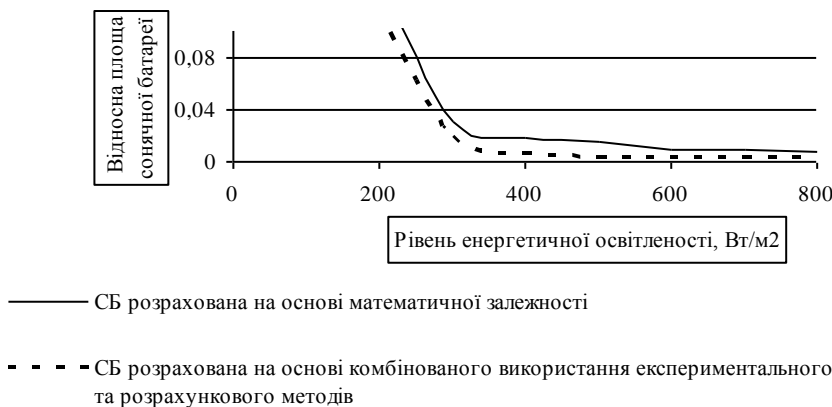


Рис. 3. Залежність, що отримана комбінованими та розрахунковими методами щодо геометричних параметрів сонячних батарей на базі сонячних елементів ПДП-структури з тонкою базовою областю
Джерело: авторська розробка

Так, наприклад, для сонячної батареї побудованої на базі сонячних елементів із структурою НДП з тонкою базовою областю отримана завдяки комбінованому підходу поліноміальна залежність площі сонячної батареї від рівня енергетичної освітленості має вигляд $S_{CB}=0,0071E^2-0,0731E+0,1833$. При використанні розрахункового підходу (рис. 3) отримана поліноміальна залежність для розрахунку площі сонячної батареї побудованої на основі сонячних елементів НДП з тонкою базовою областю приймає вигляд $S_{CB}=0,0065E^2-0,0655E+0,1531$.

Таким же чином було проведено порівняння отриманих геометричних параметрів сонячних батарей створених на основі сонячних елементів із НДП структурою з товстою базовою областю. Результати наведені на рис. 4

Поліноміальна залежність отримана при варіанті комбінованого розрахунку геометричних параметрів сонячної батареї має вигляд $S_{CB}=0,0163E^2-0,1742E+0,4449$.

Для розрахункового методу така залежність має вигляд $S_{CB}=0,0023E^2-0,0251E+0,0698$.

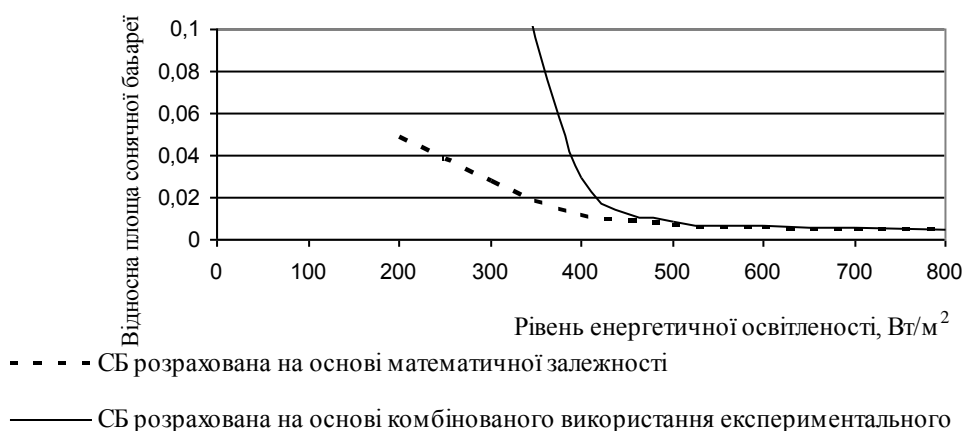


Рис. 4. Залежність, що отримана комбінованими та розрахунковими методами щодо геометричних параметрів сонячних батарей на базі сонячних елементів НДП-структури з товстою базовою областю
Джерело: авторська розробка

У випадку, коли сонячна батарея була сформована на основі сонячних елементів метал – діелектрик-напівпровідник (рис. 5) параметри на основі комбінованого використання експериментального та розрахункового методів представляє поліноміальна залежність $S_{CB}=0,008E^2-0,0873E+0,2358$.

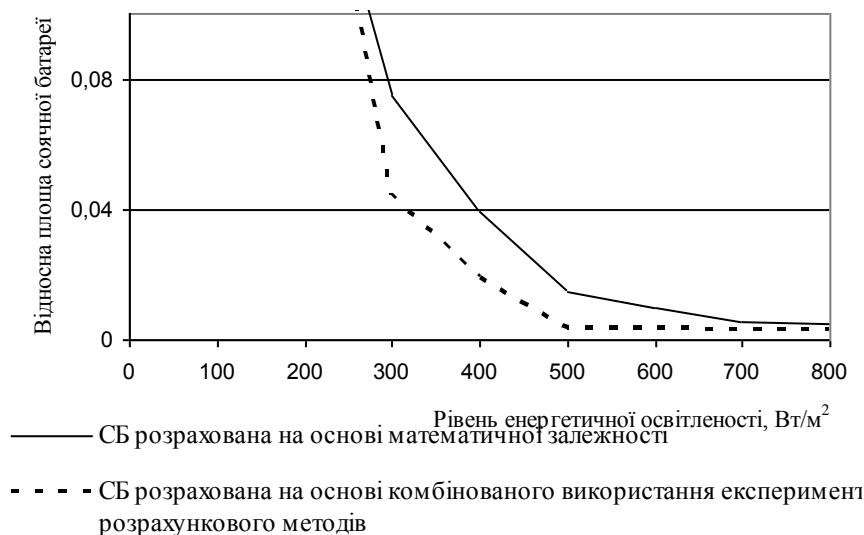


Рис. 5. Залежність, що отримана комбінованими та розрахунковими методами щодо геометричних параметрів сонячних батарей на базі сонячних елементів МДН-структури
Джерело: авторська розробка

Коли для розрахунку геометричних параметрів сонячної батареї використовувалася тільки математична залежність, то: $SCB=0,0105E2-0,1065E+0,2525$.

Отримані залежності дозволяють розрахувати геометричні параметри сонячних батарей для різних рівнів енергетичної освітленості. Також отримані залежності дозволяють провести порівняльний аналіз енергетичних та масогабаритних параметрів сонячної батареї (з урахуванням типу використаних сонячних елементів), які створені на основі таких розрахунків.

Висновки

Аналіз триманих результатів показав, що площа сонячної батареї створеної на основі НДН-структури з товстою базовою областю розрахована на основі комбінованого методу менша в 2,25 разів за відповідну площу сонячної батареї, яка розрахована за математичною залежністю. Це суттєво впливає на масогабаритні показники. Також таке збільшення суттєво впливає на кількість використаних сонячних елементів і як результат, на вартості отриманої електричної енергії.

Розраховані геометричні параметри сонячних батарей на основі сонячних елементів метал-діелектрик-напівпровідник відрізняються в 1,24 рази. Тобто відповідно і кількість сонячних елементів в батареї, яка розрахована за комбінованими результатами менша на 30%.

За однакової енергоефективності сонячних батарей побудованих з сонячних елементів НДН-структури з тонкою базовою областю кількість використаних сонячних елементів теж змінюється. При розрахунку за комбінованим методом їх кількість менша на 35%.

При проектуванні сонячних батарей з різними видами сонячних елементів доцільним є використання комбінованого методу попереднього оцінювання енергогенеруючої спроможності сонячних елементів.

Такий підхід призведе до суттєвого зменшення масогабаритних показників пристрою. Відповідно це відобразиться на вартості генерованої електричної енергії.

Література

1. Pillai S., Green M. 1.29 – Plasmonics for Photovoltaics. *Comprehensive Renewable Energy*. 2022. № 1. С. 627–643.
2. Germany's electricity generation mix 2015. *STROM-Report Renewable energy Germany*. 2015. <http://strom-report.de/renewable-energy/>.
3. Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy, 2016. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi>
4. Research cell record efficiency chart. The National Center for Photovoltaics (NCPV) at the National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2015. <http://www.nrel.gov/ncpv/>.
5. Олійник Ю. С. Використання сонячних батарей у сучасних умовах / Ю. С. Олійник // *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського*. – 2018. – № 29. – С. 220–224.
6. Брич В. Я. Проблеми застосування сонячної енергії в сфері житлово – комунального господарства / В. Я. Брич, Б. Р. Гевко // *Інноваційна економіка*. – 2016. – № 1. – С. 152–157.
7. Будько В. І. Перекриття небалансів згенерованої та прогнозованої електроенергії сонячною електростанцією за рахунок системи акумуляування електричної енергії / В. І. Будько, Я. В. Вайнштейн // *Відновлювана енергетика*. – 2021. – № 4. – С. 25–31.

8. Гаевская А. Н. Алгоритм аппроксимации вольт-амперных характеристик фотомодулей в условиях частичного затенения / А. Н. Гаевская // *Відновлювана енергетика*. – 2019. – № 3. – С. 21–29.
9. Гнатов А. В. Визначення оптимальних параметрів навантаження для ефективної роботи кремнієвих сонячних батарей / А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун, О. А. Дзюбенко // *Вісник ХНАДУ*. – 2018. – № 80. – С. 53–58.
10. Гаевский А. Ю. Определение оптимальных углов наклона фотоэлектрических панелей / А. Ю. Гаевский, О. В. Ушкаленко // *Відновлювана енергетика*. – 2016. – № 1. – С. 21–27.
11. Шкляр В. І. Розрахунок геліо системи з фотоелектричними перетворювачами / В. І. Шкляр, В. В. Дубровська. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 52 с.
12. Маринець С. Вплив тіні на роботу сонячних батарей [Електронний ресурс] / С. Маринець. – Режим доступу : <https://solarsoul.net/uk/vpliv-tini-na-robotu-sonyachnix-batarej>.
13. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V. Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Boston, USA: Primedia eLaunch, 2021. 172 p.
14. Nakashydz L. V., Gabrinets V. O., Tytarenko I. V. Providing energy-saving technologies: technical, ecological and economic aspects. New York: Yunona Publishing, 2019. 134 p.
15. Tonkoshkur A., Ivanchenko A. Algorithm for representations of the polyswitch fuse characteristics in the modeling problems. *System technologies*. 2019. №1. P. 143–149.
16. Hilorme T., Nakashydz L., Mazyrik S. Substantiation for the selection of parameters for ensuring electro-thermal protection of solar batteries in spacecraft power systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 3. P. 17–24.
17. Nakashidze L., Hilorme T., Nakashidze I. Substantiating the criteria of choosing project solutions for climate control systems based on renewable energy sources. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 3. P. 42–50.
18. Hilorme T., Nakashidze L., Tonkoshkur A. Devising a calculation method for determining the impact of design features of solar panels on performance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 3. P. 30–36.

References

1. Pillai S., Green M. 1.29 – Plasmonics for Photovoltaics. *Comprehensive Renewable Energy*. 2022. № 1. C. 627–643.
2. Germany's electricity generation mix 2015. *STROM-Report Renewable energy Germany*. 2015. <http://strom-report.de/renewable-energy/>.
3. Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy, 2016. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi>
4. Research cell record efficiency chart. The National Center for Photovoltaics (NCPV) at the National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2015. <http://www.nrel.gov/ncpv/>.
5. Oliynyk Yu.S. The use of solar batteries in modern conditions. *Scientific notes of TNU named after V.I. Vernadskyi*. 2018. № 29 (68). P. 220–224. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/29-68-2>
6. Brych V.Ya., Gevko B.R. Problems of using solar energy in the field of housing and communal services. *Innovative economy*. 2016. № 1 (61). P. 152–157. URL: http://ie.at.ua/index/arkhiv_nomeriv/0-5
7. Budko V.I., Vainstein Y.V.. Covering the imbalances of the generated and forecasted electricity by the solar power plant due to the electric energy storage system. *Renewable energy*. 2021. № 4(67). P. 25–31. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).25-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).25-31)
8. Gaevskaya A.N. Algorithm for approximation of current-voltage characteristics of photomodels under conditions of partial shading. *Vidnovlyuvana energy*. 2019. №3 (58). P. 21–29. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).21-29](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).21-29)
9. Hnатов A.V., Arghun Sh.V., Dzyubenko O.A. Determination of optimal load parameters for efficient operation of silicon solar batteries. *Herald of the KHNADU*. 2018. P. 53–58. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2018.80.0.53>
10. Gaevsky A.Yu., Ushkalenko O.V. Determination of optimal tilt angles for photovoltaic panels. *Vidnovlyuvana energy*. 2016. №1 (44). C. 21–27. URL: <https://ve.org.ua/index.php/journal/issue/view/9>
11. Shklyar V.I., Dubrovskaya V.V. Calculation of a helio system with photoelectric converters. K.: NTUU "KPI". 2015. 52 p.
12. Marynets S. The influence of shade on the operation of solar batteries. URL: <https://solarsoul.net/uk/vpliv-tini-na-robotu-sonyachnix-batarej>
13. Tonkoshkur A. S., Ivanchenko A. V., Nakashydz L. V. Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. Boston, USA: Primedia eLaunch, 2021. 172 p.
14. Nakashydz L. V., Gabrinets V. O., Tytarenko I. V. Providing energy-saving technologies: technical, ecological and economic aspects. New York: Yunona Publishing, 2019. 134 p.
15. Tonkoshkur A., Ivanchenko A. Algorithm for representations of the polyswitch fuse characteristics in the modeling problems. *System technologies*. 2019. №1. P. 143–149.
16. Hilorme T., Nakashydz L., Mazyrik S. Substantiation for the selection of parameters for ensuring electro-thermal protection of solar batteries in spacecraft power systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 3. P. 17–24.
17. Nakashidze L., Hilorme T., Nakashidze I. Substantiating the criteria of choosing project solutions for climate control systems based on renewable energy sources. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 3. P. 42–50.
18. Hilorme T., Nakashidze L., Tonkoshkur A. Devising a calculation method for determining the impact of design features of solar panels on performance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 3. P. 30–36.