

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ДЕГРАДАЦІЮ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

В статті обґрунтовано актуальність питання щодо дослідження та аналізу впливу деградації на ефективність роботи сонячних панелей. Проведено короткий аналіз основних особливостей використання сонячних панелей різних типів. Детально розглянуто основні види та причини деградації фотоелектричних модулів. Отримано основні висновки щодо найбільш впливових чинників деградації, серед яких доцільно виділити для подальшого дослідження вплив температури – як зовнішньої температури повітря, так і температури нагрівання безпосередньо сонячної панелі. Проведений аналіз сучасних досліджень з питань вивчення особливостей деградації фотоелектричних модулів. Особливу увагу акцентовано на дослідженнях впливу температури на ефективність їх роботи. На базі лабораторної установки проведені попередні експериментальні вимірювання параметрів роботи сонячної панелі при різних інтенсивностях світла та при нагріванні панелі в межах від 19 до 78 °С. На основі отриманих даних побудовано графік залежності ефективності сонячного фотомодуля від температури його поверхні та встановлено, що ефективність роботи панелі починає активно знижуватись після зростання температури її поверхні понад 50-55°С.

Ключові слова: аналіз, сонячна панель, ефективність роботи, деградація, температура, дослідження

Вступ

Одним із найбільш важливих напрямків сучасності, з яким пов'язані цілі сталого розвитку ООН, є розвиток відновлюваних джерел енергії. Найбільшого поширення серед відновлюваної енергетики на сьогодні набула саме сонячна. На теренах нашої держави сонячні електростанції почали експлуатуватись близько 20-ти років назад, а найбільш масового поширення набули за останні 5-7 років. В той же час, основна складова сонячних станцій – фотоелектричні модулі – за заявами виробників можуть експлуатуватись із максимальною та достатньою ефективністю впродовж 20-30 років, протягом яких панелі поступово деградують, що призводить до зниження ефективності вироблення ними енергії. Станом на сьогодні у світі відсутня значна кількість сонячних панелей, які вже експлуатуються нормативний термін, а в Україні такі фотоелектричні модулі практично відсутні. У зв'язку з цим, чітко підтвердити зниження їх ефективності після встановленого терміну експлуатації на даний час дуже складно. Також виникає питання необхідності подальшої утилізації сонячних панелей, які не придатні для подальшої експлуатації, що може бути складним екологічним питанням майбутнього. Тому, важливим та актуальним завданням є необхідність оцінювання рівня деградації сонячних панелей, які перебувають в експлуатації, а також визначення впливу температури, як основної причини деградації, на ефективність їх роботи.

Метою даної статті є аналіз основних причин деградації фотоелектричних модулів, а також оцінювання впливу температури на ефективність роботи сонячної панелі.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні **завдання**:

- провести аналіз особливостей використання сонячних панелей різних типів;
- проаналізувати основні причини, які викликають розвиток деградаційних процесів у фотоелектричних модулях;
- провести аналіз існуючих досліджень з питання деградації та впливу температури на роботу сонячних панелей;
- провести попередні вимірювання щодо зміни ефективності роботи сонячної панелі при зміні температури на прикладі лабораторної установки.

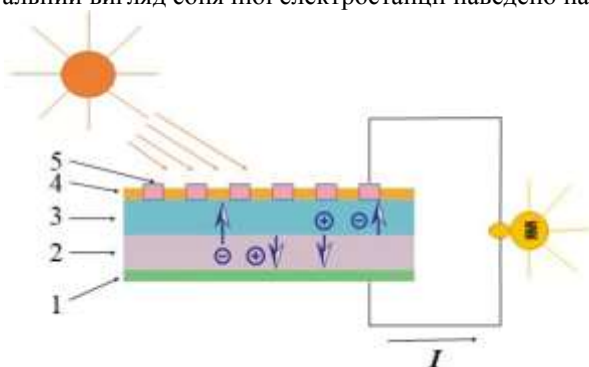
Матеріал і результати досліджень

Аналіз особливостей використання сонячних панелей

Сонячна батарея – це об'єднання фотоелектричних модулів (PV – photovoltaic modules), які використовуються для поглинання більшої кількості світлової енергії, що, відповідно, дозволяє виробляти більшу кількість електричної енергії [1]. Фотоелектричний модуль – це з'єднання фотоелементів. Фотоелемент – це напівпровідниковий пристрій, що перетворює сонячну енергію в електричну. Робота сонячної панелі полягає в об'єднанні енергії, яка виробляється багатьма комірками. Це дає змогу створити корисну кількість електричного струму та напруги за допомогою фотоелектричного ефекту.

Фотоэффект – це явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини й останні переходять у новий енергетичний стан [2]. Тобто фотоэффект – це повне або часткове вивільнення електронів від зв'язків з ядрами атомів речовини внаслідок дії на неї електромагнітного проміння (світла, рентгенівського чи гамма-променів).

Для роботи сонячних станцій сонячні батареї з'єднуються між собою послідовно і паралельно. Це пов'язано з тим, що послідовне з'єднання забезпечує більшу напругу, а паралельне – більшу силу струму. Якщо на одній сонячній панелі виникне тінь, то цілий ряд панелей не буде працювати, тому суттєво зменшиться вихідна потужність роботи сонячних панелей в загальному. Схема будови сонячної панелі наведена на рисунку 1. Загальний вигляд сонячної електростанції наведено на рисунку 2.



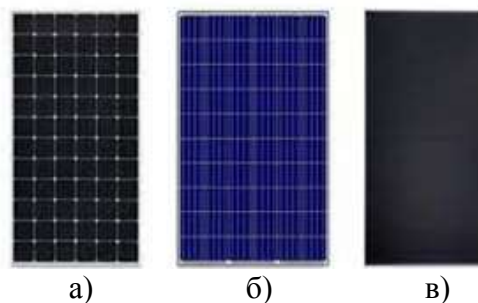
1 – внутрішній електрод, 2 – напівпровідник p-типу, 3 – напівпровідник n-типу, 4 – антиблік-покриття, 5 – зовнішній електрод, I – струм

Рисунок 1 – Будова сонячної батареї

В загальному сонячні панелі бувають кристалічні (які поділяються на моно- та полікристалічні) і тонкоплівкові (рисунок 3) [3]. Кристалічні сонячні панелі виготовляються з кремнію, який спочатку розплавляється. Потім сплав кремнію кристалізується у злитки з чистого кремнію. Тонкі пластини кремнію вирізаються з монокристалу кремнію (монокристалічний) або зі злитків кристалів кремнію (полікристалічний). Ефективність для цих типів фотоелементів становить від 15 до 25%.



Рисунок 2 – Загальний вигляд сонячної електростанції



а) монокристалічні, б) полікристалічні, в) тонкоплівкові

Монокристалічний кремній – це тип кремнію, виготовлений із монокристалічної структури. Монокремній має однорідну форму, оскільки вся структура вирощена з одного кристала. Тому вони мають більшу щільність поглинання сонячної енергії. Це призводить до високої ефективності перетворення енергії монокристалічних сонячних панелей – від 20 до 25%. Монокристалічні панелі мають високу вихідну потужність, займають менше місця і служать найдовше. Ще одна перевага, яка полягає в тому, що вони дещо менше зазнають впливу високих температур у порівнянні з полікристалічними панелями.

Полікристалічний кремній – це тип кремнію, виготовлений зі злитків кристалів кремнію. Через злитки кристалів кремнію виникають межі між ними. Це в свою чергу спричиняє обмеження проходження електронів у фотоелементах. Це призводить до зменшення ефективності перетворення енергії полікристалічних панелей, яка складає від 15 до 20%.

Тонкоплівковий фотоелектричний елемент – тип фотоелемента, який виготовляють шляхом друку або розпилення тонкого напівпровідникового шару матеріалу на скляну, металеву або пластикову фольгу. Товщина кожного фотоелемента значно менша за розрізаний кристалічний елемент. Ефективність перетворення енергії цих сонячних панелей складає від 7 до 12%. Тонкоплівкові сонячні панелі можуть

виготовлятися з таких матеріалів: телурид кадмію (CdTe), аморфний кремній, диселенід міді-індію (CIS), селенід міді-індію-галію (CIGS) [4].

Монокристалічні і тонкоплівкові сонячні панелі використовуються для домашніх електростанцій. Монокристалічні трекерні і полікристалічні сонячні панелі використовуються в основному для промислових підприємств.

Аналіз причин деградації сонячних панелей

Деградація сонячних панелей – це зменшення вихідної потужності сонячних панелей з часом, яке спричинене виникненням різних фізичних процесів та яке призводить до зниження їх ефективності та, можливо, до виходу з ладу.

Залежно від причин пошкодження, деградацію доцільно поділити на такі види [5-12]:

1. Механічна деградація [6-8,11];
2. Деградація, викликана впливом навколишнього середовища [5-7];
3. Електрична деградація [5,8-10];
4. Деградація, пов'язана з будовою сонячних панелей [8,11,12].

Механічна деградація – деградація, викликана механічними пошкодженнями. Наслідком механічної деградації можуть бути:

1. Мікротріщини [11];
2. Розшарування [8].

Деякі типи мікротріщин можуть вирости залежно від їх форми та розташування в фотоелектричному модулі. Це зростання може статися через транспортування, неправильне встановлення, пошкодження, вібрацію, надмірне навантаження, неправильне очищення, а також під час експлуатації та етапу обслуговування. Нові панелі можуть мати мікротріщини, але їхній вплив нехтується; проблема виникає, коли панелі піддаються декільком умовам, таким як погодні умови, очищення тощо [11]. Приклад мікротріщин зображено на рисунку 4, (б).

Розшарування відбувається через втрату міжфазних зв'язків, що призводить до появи проміжків між склом–EVA, EVA–коміркою, коміркою–EVA та EVA–задньою стороною фотоелектричного модуля. За даними SolarWorld (німецька компанія), проблема розшарування спостерігалася у понад 90% відновлених модулів. Це явище в основному характерне і реєструється в екстремальних погодних умовах (дуже жарко і волого). Зменшення продуктивності модуля через індукцію проникнення вологи, що призводить до погіршення вихідної потужності, і збільшення послідовного опору є наслідками розшарування [8]. Розшарування зображено на рисунку 4, (а).

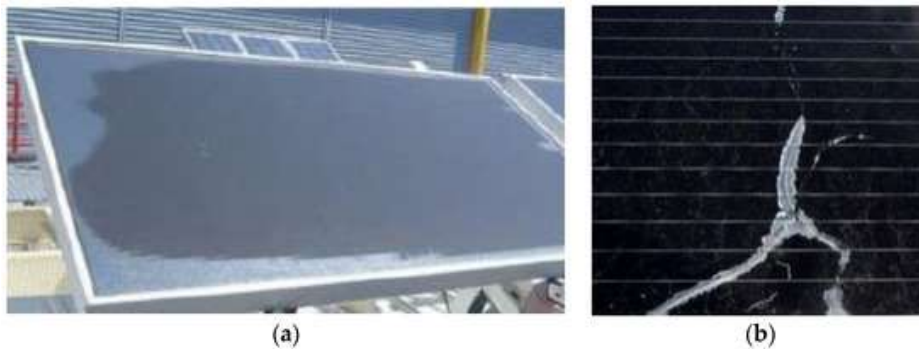


Рисунок 4 – Пошкоджені сонячні панелі: (а) розшарування; (б) тріщини [8,11]

Сонячні модулі схильні до впливу зовнішніх факторів, що неминуче - це природний знос сонячних панелей. Такі процеси старіння відбуваються через хімічні реакції в напівпровідниках, що викликають кристалічні затвердіння, а також із-за забруднення фотомодулів, кліматичних умов, впливу ультрафіолету. Зазвичай, даний тип деградації незворотній, і з економічної точки зору сенсу в його усуненні немає [5].

Втрати від забруднення відносяться до втрат потужності, що виникають в результаті дії снігу, бруду, пилу та інших речовин, які покривають поверхню сонячного модулю. Інтенсивність забруднення поверхні модулю залежить від місця його розташування та навколишнього середовища. Фактично кількість накопиченого пилу на поверхні модуля впливає на загальну енергію, що генерується модулем. За даними проведеного дослідження у 2014 році встановлено, що Близький Схід та Північна Африка є територіями з найбільшим накопиченням пилу у світі [6].

Електрична деградація – деградація, яка залежить від електричних процесів, проходження струму, які викликають зменшення вихідної потужності сонячних панелей. До електричної деградації може належати потенційна індукована деградація (PID), яка спричиняє виникнення струмів витоку із сонячних панелей, через що зменшується вихідна потужність сонячних панелей. Ще до електричної деградації належить електроміграція (EM).

Електроміграція (ЕМ) має величезний вплив на металізацію та з'єднання фотоелектричних модулів. Високий струм, що проходить через фотоелектричний модуль, може спричинити перепад напруги та потенційно призвести до ЕМ. Збої внаслідок цього явища, які впливають на зростання ямок травлення на межі розділу метал/напівпровідник, можуть бути різними, а утворення горбів і виступів, які викликають замикання (шунтування), і утворення пустот у провіднику зрештою призводять до відкритого розриву. І передне, і заднє з'єднання перетинають стінку комірки в межах невеликої зони дефекту шунта, знижуючи якість сонячної батареї [8]. На рисунку 5 зображено результати випробування надійності металізації Cu/Ni/Si сонячних елементів при температурі 235 °С, через що мідь починає мігрувати (дифундувати) в Ni/Si, в результаті чого на сонячних панелях утворюються масивні порожнечі.

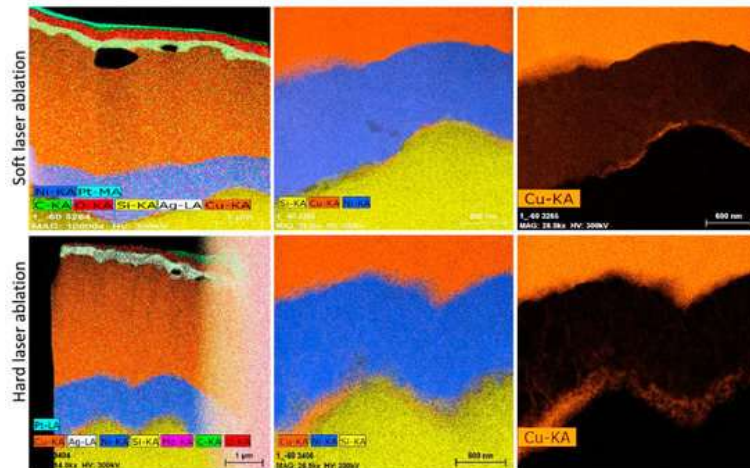


Рисунок 5 – Cu/Ni/Si стек TEM-зображення, отримані після прискореного старіння при 235 °С [8]

Деградація, пов'язана з будовою сонячних панелей залежить від [13]:

- 1) технології виробництва;
- 2) застосовуваних при виготовленні матеріалів;
- 3) методу пайки сонячних елементів;
- 4) якості EVA плівки, розташованої між скляною плитою і елементами;
- 5) хорошої герметизації і якості нижньої захисної плівки.

В загальному, деградація сонячних панелей поділяється на три основні види:

1. Світлова індукована деградація (LID – Light induced degradation) [5,12];
2. Потенційна індукована деградація (PID – Potential induced degradation) [5,8-10];
3. Температурна індукована деградація (TID – Temperature induced degradation) [12].

Світлова індукована деградація (LID) – деградація сонячних панелей, яка виникає, коли сонячна панель вперше піддається впливу сонячної радіації, в результаті її фотопровідність зменшується. Це вважається етапом «налаштування» панелі.

Потенційна індукована деградація (PID) – деградація сонячних панелей, яка виникає, коли різні компоненти в системі знаходяться під різними напругами. Наприклад, при різниці потенціалів між сонячними елементами і рамкою (монтажною конструкцією, алюмінієвим або сталевим каркасом). Таке відхилення викликає витік напруги і, отже, знижує вихідну потужність панелі. PID не завжди відбувається, але якщо це трапиться, продуктивність панелі може знизитися аж до 30%. Схильні до неї всі типи панелей. У деяких випадках потенційна деградація може бути оборотною, але цей процес завжди є досить непростою технічною проблемою, яка потребує швидкого вирішення [5].

Температурна індукована деградація (TID) – деградація сонячних панелей, яка викликана підвищенням температури навколишнього середовища, і відповідно, підвищенням температури сонячних панелей, в результаті чого зменшується вихідна потужність сонячних панелей. Підвищення температури навколишнього середовища призводить до ще більшого підвищення температури сонячних панелей, оскільки сонячні панелі складаються переважно з кремнію, а кремній – метал. Влітку в спекотну погоду температура поверхні сонячних панелей може підвищуватися до 50–60 °С. Така висока температура поверхні сонячних панелей призводить до зниження ефективності сонячних панелей. Тому, підвищення температури поверхні сонячних панелей також впливає на прискорення їх деградації.

Швидкість деградації сонячних панелей також залежить від будови модулів, для прикладу, монокристалічні модулі зазвичай працюють 30 років і більше, полікристалічні можуть служити 20 і більше років, тоді як аморфні тільки від 7 до 20 років (все залежить від року виробництва і застосування нових тонкоплівкових технологій) [13].

В середньому фотоелектричні елементи втрачають ефективність зі швидкістю 1% щороку. Це підтверджують виробники – зазвичай, вони гарантують 90% продуктивності до перших десяти років і 80% до 25 або 30 років роботи. Однак нові дослідження підтверджують, що монокристалічні панелі, виготовлені після 2000 року, можуть деградувати зі швидкістю всього 0,4%. Тонкоплівкові батареї втрачають в середньому 10-40% ефективності в перші кілька років.

Виробники визначають «корисний» термін служби сонячних панелей – коли їх обсяг виробництва падає нижче 80%. Але це не означає, що вони не приносять користі. СЕС буде продовжувати виробляти енергію з більш низьким рівнем ефективності [13].

Тому важливо зрозуміти чи є можливість сповільнення деградації та доцільність продовження використання сонячних панелей після встановленого виробниками терміну експлуатації.

Аналіз досліджень впливу температури на ефективність роботи сонячних фотомодулів

Важливим завданням сьогодні є оцінювання впливу різноманітних чинників на ефективність (коефіцієнт корисної дії) роботи сонячних панелей, який описує частку енергії сонячного світла, яке падає на поверхню сонячних панелей, і яка перетворюється на електричну енергію. На зниження ефективності фотоелектричних модулів і на їхній термін експлуатації впливає деградація сонячних модулів. Серед усіх видів деградації сонячних панелей, які наведені вище, найпоширенішою є температурна, яка спричинена постійним підвищенням температури поверхні сонячних панелей. Тому важливо досліджувати саме вплив температури на ефективність експлуатації фотоелектричних модулів [14,15].

На даний час все збільшується кількість досліджень в сфері деградації сонячних панелей та безпосередньо впливу зміни температури на ефективність їх роботи. Так, для прикладу, Чорна В. О., Мельник О. Є. та ін. досліджували вплив погодних умов на ефективність роботи фотоелектричної установки [16], питанням деградації сонячних панелей займаються Панченко В. В. та Харін Р. О. [17], вплив метеорологічних умов на ефективність роботи сонячних панелей в Івано-Франківській області досліджували Архипова Л. М. та Смик І. Є. [18], залежність ефективності роботи сонячних панелей від температури навколишнього середовища досліджувала Нечепоренко О. О. [19], Захаров Д. В. і Книш Л. І. математично моделювали вплив температурного режиму на ефективність роботи сонячної панелі [20].

Чорна В. О., Мельник О. Є. та ін. в [16] визначали формули для струму, який виробляють сонячні панелі, формули залежності температури поверхні сонячних модулів від метеорологічних параметрів таких, як температура повітря, вологість повітря, тиск повітря, швидкість вітру та інтенсивності світла. Знайшовши температуру поверхні сонячних панелей, визначали струм короткого замикання, напругу і струм, які забезпечують максимальну потужність (МРР) сонячних панелей. Також отримали вольт-амперну характеристику сонячних панелей кожного місяця протягом року та вольт-ватну характеристику в березні; отримали таблицю відповідності виробленої сонячними панелями електроенергії навантаженню при різній їх кількості впродовж року.

Панченко В. В. та Харін Р. О. визначали в [17] формулу для розрахунку швидкості деградації сонячних панелей протягом встановленого терміну їхньої роботи. Дослідження пов'язані із зниженням ефективності протягом різного терміну роботи сонячних панелей моно- та полікристалічного типу. Автори також визначали вольт-амперну та вольт-ватну характеристику сонячних панелей та зміну втрат невідповідності отриманих залежностей при різних довжинах провідників, щоб встановити залежність виробництва електроенергії від опору провідника. Ті самі характеристики отримали для залежності від температури. Дослідження проводились при температурі 40 і 50 °С, з якої встановили, що більша потужність буде вироблятися при температурі 40 °С, а при 50 °С потужність буде меншою. Також проводилось досліджувати вплив наявності дефектного модуля за різних умов та інтенсивності світла. Отримані різні графіки швидкості деградації залежно від терміну роботи сонячних панелей.

Архипова Л. М. та Смик І. Є. отримали в [18] таблиці середньомісячних значень метеорологічних параметрів таких, як температура повітря, кількість опадів, швидкість вітру та побудували відповідні графічні залежності за період 2015-2022 років. Отримані також дані щодо помісячного виробництва електроенергії сонячною електростанцією за той же період часу. На основі отриманих результатів авторами зроблений висновок, що найбільший вплив на виробництво електроенергії має температура повітря, а інші параметри мають незначний вплив. На основі побудованого графіка залежності виробництва електроенергії від температури можна зробити висновок, що при збільшенні температури повітря до 21 °С виробництво електроенергії також зростає, а при зростанні температури вище 21 °С виробництво електроенергії починає зменшуватися.

Нечепоренко О. О. досліджувала в [19] причини впливу підвищення температури навколишнього середовища на зменшення ефективності сонячних панелей. Автором встановлено лінійну залежність ефективності сонячної панелі від температури за допомогою температурного коефіцієнта, які вказуються виробником в паспорті. Отримано вольт-амперну характеристику виробництва електроенергії сонячними панелями при різній температурі. З отриманих даних зрозуміло, що при збільшенні температури поверхні панелі зменшується напруга і незначно збільшується струм, в результаті чого зменшується вихідна потужність.

Захаров Д. В., Книш Л. І. визначали в [20] рівняння теплового балансу сонячної панелі, рівняння теплопровідності, яке відповідає рівнянню Пуассона, що описує функцію декартових координат x і y та описує об'ємну щільність теплового потоку від дії внутрішніх джерел тепла, виражене на одиницю коефіцієнта теплопровідності, які в сумі дорівнюють нулю. Також визначена формула для об'ємної щільності теплового потоку, яка визначається функцією коефіцієнта корисної дії (ККД) від температури, інтенсивністю світла та висотою панелі. Два останні рівняння доповнюються граничними умовами для декартових координат x , y . В цих рівняннях є функції довжини сонячної панелі x та y , вказується також температура навколишнього середовища та коефіцієнти тепловіддачі та поглинання тіла. Коефіцієнт тепловіддачі розраховувався відповідно до критеріїв Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля та Грасгофа. Радіаційні втрати з поверхні сонячної панелі розраховувалися відповідно до Закону Стефана–Больцмана. В рівнянні Пуассона міститься залежність ККД від температури. Для знаходження цієї залежності були апроксимовані з використанням регресійного аналізу експериментальні дані, в результаті чого отримали рівняння для функції зміни ККД залежно від температури сонячної панелі. Також був розроблений числовий алгоритм для моделювання, в результаті чого отримано графіки залежності температури від довжини панелі при різній висоті та при врахуванні чи без врахування ККД. Отримані реальні результати ККД, яке враховує ККД, заявлене виробником, а також супутні параметри, які розраховуються за допомогою поверхневих інтегралів. Як висновок в роботі авторів отримано реальне значення ККД, яке є меншим, ніж ККД, заявлене виробником, на 0,01. Незначне зниження ККД на одній сонячній панелі може призводити до енергетичних витрат в промислових масштабах.

Таким чином, можна стверджувати, що питання оцінювання впливу температури на ефективність роботи сонячних станцій активно розвивається та потребує більше детального оцінювання. Для цього нами були проведені попередні вимірювання впливу температури нагрівання сонячної панелі на її ефективність роботи. Дані вимірювання проведені на базі наявної лабораторної установки в університеті. Деталі проведених вимірювань наведені нижче.

Оцінювання впливу температури сонячної панелі на ефективність її роботи

З метою оцінювання впливу температури на ефективність фотоелектричних модулів нами було проведено експериментальні дослідження роботи сонячного фотомодуля при різному його нагріванні від 19 до 78 °С. Також ми збільшували інтенсивність світла, в ролі джерела якого використовувалася галогенна лампа, від 187 до 2000 Вт/м². Змінювати інтенсивність світла в галогенній лампі можна, змінюючи вхідну напругу, яка подається на лампу. Для вимірювання температури поверхні фотомодуля використовувався пірометр, а для вимірювання інтенсивності світла – піранометр. Електричне коло експерименту, яке зображене на рисунку 6, складається з джерела струму, тобто із сонячної панелі, навантаження, до якого належить декадний магазин додаткових опорів, і ампервольтметра.

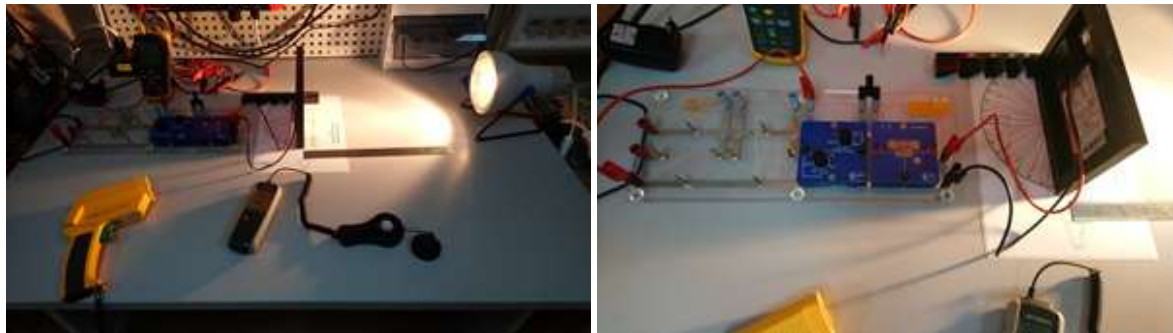


Рисунок 6 – Схема елементів експерименту для дослідження ефективності роботи сонячних фотомодулів під впливом температури

Отримані результати прямих вимірювань таких параметрів, як температура, вихідна напруга, струм та інтенсивність світла при різній температурі нагрівання. Непрямим способом визначалась вихідна потужність, її значення на одиницю площі, а також ефективність сонячної панелі. Вихідна потужність P визначається добутком виміряних напруги U і струму I . Вихідна потужність на площу P/S – відношення вихідної потужності P до площі S . Площа сонячної панелі S визначається добутком довжини l на ширину w панелі, яка вимірюється за допомогою лінійки. Площа сонячної панелі, з якою проводилося дослідження дорівнює: $S = 0,01378$ м². Це потрібно, щоб, знаходячи ефективність, була визначена однакова площа, як для інтенсивності світла, так і для вихідної потужності. Ефективність сонячної панелі e визначається відношенням електричної енергії $E_{ел}$, яку виробляє панель, до енергії падаючого світла $E_{св}$, якщо цю енергію звести, поділивши на час і площу, тоді ефективність e буде визначатися відношенням вихідної потужності на площу P/S до інтенсивності світла E . Ефективність e знаходиться за формулою (1):

$$e = \frac{E_{ел}}{E_{св}} = \frac{P_{ел}}{P_{св}} = \frac{P/S}{E} = \frac{P}{S \cdot E} = \frac{U \cdot I}{S \cdot E} = \frac{U \cdot I}{l \cdot w \cdot E} \quad (1)$$

де $P_{ел}$ і $P_{св}$ – електрична вихідна потужність і потужність падаючого світла відповідно, які знаходяться відношенням електричної енергії $E_{ел}$ і енергії падаючого світла $E_{св}$ до часу відповідно.

В таблиці 1 наведено фрагмент отриманих результатів вимірювань і розрахунків при температурі від 19 до 28 °С.

Таблиця 1 – Результати вимірювання і розрахунків параметрів експериментального дослідження при нагріванні фотомодуля від 19 до 28 °С

№ дослідю	Температура поверхні сонячної панелі t, °С	Ефективність сонячної панелі e, %	Вихідна напруга U, В	Вихідний струм I, мА	Вихідна потужність P, Вт	Вихідна потужність на площу P/S, Вт/м ²	Інтенсивність світла E, Вт/м ²
1	19	0,617507354	0,899	17,7	0,0159123	1,154738752	187
2	20	0,644839068	0,913	18,2	0,0166166	1,205849057	187
3	21	0,654773639	0,922	18,3	0,0168726	1,224426705	187
4	22	0,715269747	0,955	19,3	0,0184315	1,337554427	187
5	23	0,693110996	0,945	18,9	0,0178605	1,296117562	187
6	24	0,667673059	0,93	18,5	0,017205	1,248548621	187
7	25	0,66478333	0,95	18,9	0,017955	1,302975327	196
8	26	0,693144457	0,97	19,3	0,018721	1,358563135	196
9	27	0,777822932	1,16	23,1	0,026796	1,944557329	250
10	28	0,811785196	1,18	23,7	0,027966	2,02946299	250

На основі отриманих даних побудовано графік залежності ефективності сонячного фотомодуля від температури його поверхні при нагріванні від 19 до 78 °С, який наведений на рисунку 7. Також побудовано криву апроксимації отриманих результатів на базі поліному другого степеню із коефіцієнтом детермінації $R^2=0,8168$.

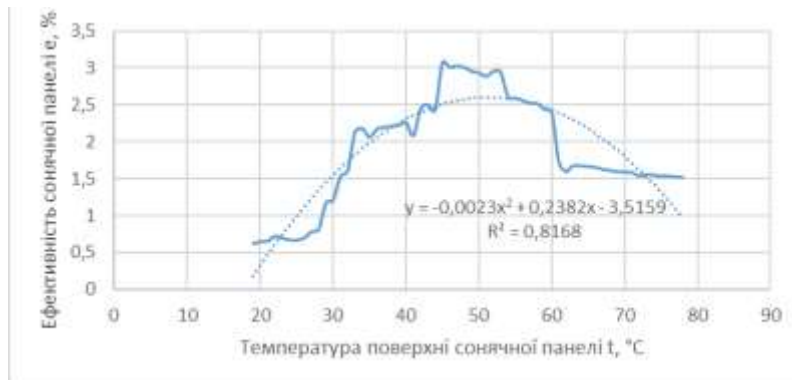


Рисунок 7 – Графік залежності ефективності роботи сонячного фотомодуля від температури $e(t)$ при нагріванні від 19 до 78 °С

Висновки

Згідно отриманих результатів можна судити про максимальну ефективність роботи сонячного фотомодуля при температурі його нагрівання 45-53 °С. При зростанні температури понад 50-55 °С ефективність виробітку електричної енергії починає активно знижуватись, що свідчить про зменшення ефективності роботи сонячного фотомодуля загалом.

Для підтвердження та деталізації отриманих даних подальшим завданням є проведення аналогічних досліджень з різними типами сонячних панелей та у різних умовах експлуатації. Також наступним кроком буде додаткове дослідження впливу зовнішньої температури на ефективність експлуатації фотоелектричних модулів, а також пошук конкретного зв'язку впливу даної температури на нагрівання сонячних елементів та, відповідно, оцінювання впливу даних параметрів на процес деградації сонячних панелей загалом.

Список використаної літератури

1. Шаварський В., Тиш Є. Основні поняття систем перетворювачів сонячної енергії. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2022. С. 98.
2. Засєкіна Т. М., Засєкін Д. О. Фізика (профільний рівень, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтєва В. М.) Розділ 3. Оптика. §47 Фотоефект : підручник для 11 класів закладів загальної середньої освіти. Київ : УОВЦ «Оріон», 2019. С. 222–229.

3. Стрельцов О. А., Шкарупа А. О. Аналіз особливостей сонячних батарей. Харків : ХНУ радіоелектроніки, 2022. С. 89–94.
4. Дешевих О. В. Дослідження характеристик і параметрів фотовольтаїчних перетворювачів : магістерська дисертація. Кривий Ріг : Криворізький державний педагогічний університет, 2021. 55 с.
5. Діхтяренко Б. Р., Скурский М. С. Методи оцінки параметрів деградації сонячних панелей. Київ : КПІ ім. Сікорського, 2020. С. 416–418.
6. Шаповал В. С., Шведчикова І. О. Вплив факторів навколишнього середовища на ефективність роботи сонячних панелей. Київ : КНУ технологій та дизайну, 2019. С. 50–51.
7. Study of the influence of dust deposits on photovoltaic solar panels: Case of Nouakchott. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082621000569>.
8. Sustainability | Free-Full-Text | Delamination-and Electromigration-Related Failures in Solar Panels–A Review. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6882>.
9. Трихлеб А. С., Панасюк І. В. Дослідження процесу відновлення деградованих сонячних панелей. Київ : КНУ технологій та дизайну, 2022. С. 27–34.
10. Чертова Д. О., Соколов М. К., Алфьоров М. Є. Деградація сонячних панелей. Харків : ХНУ радіоелектроніки, 2018. С. 152–153.
11. Sustainability | Free-Full-Text | A Comprehensive Evaluation on Types of Microcracks and Possible Effects on Power Degradation in Photovoltaic Solar Panels. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/16/6416>.
12. Sebastian Pingel, Torsten Geipel, Juliane Berghold. Initial Degradation of Industrial Silicon Solar Cells in Solar Panels. Germany, Tenenloye : Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2010. 7 p.
13. Деградація сонячних панелей: як і чому це відбувається? URL: <https://www.solargarden.com.ua/degradatsiya-sonyachnyh-panelej-yak-i-chomu-tse-vidbuvayetsya/?movaUK=UK>.
14. Цих В. С., Кульчак А. М. Особливості деградації сонячних панелей в умовах експлуатації : матеріали І Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми теплоелектроенергетики та захист довкілля», м. Полтава, 21-22.09.2023 р. С. 21–23.
15. Цих В. С., Кульчак А. М. Дослідження впливу температури на ефективність роботи сонячних фотомодулів : матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку», м. Київ, 22-24.11.2023 р. С. 17–18.
16. Чорна В. О., Мельник О. Є., Омельченко О. В., Некрасов А. В., Федь М. Г. Дослідження впливу погодних умов на ефективність роботи фотоелектричної установки. Київ : Таврійський національний університет ім. В. І. Вернадського, 2018. С. 119–124.
17. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції. Харків, Український державний університет залізничного транспорту, 2023. С. 73–82.
18. Архипова Л. М., Смик І. Є. Аналіз впливу метеорологічних умов на ефективність роботи сонячних панелей в Івано-Франківській області. Івано-Франківськ : Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2023. С. 99–107.
19. Нечепоренко О. О. Залежність ефективності сонячних панелей від температури навколишнього середовища. Київ : Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 574–575.
- Захаров Д. В., Книш Л. І. Математичне моделювання впливу температурного режиму на ефективність сонячної панелі. Дніпро : Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, 2022. С. 48–58.

V. Tsykh¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-9095-4099

A. Kulchak¹, student, ORCID 0009-0008-5241-1975

A. Yavorskyi¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5970-4286

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ANALYSIS OF RESEARCH ON THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE DEGRADATION AND EFFICIENCY OF SOLAR PANELS

The article substantiates the relevance of the issue of researching and analyzing the impact of degradation on the efficiency of solar panels. A brief analysis of the main features of the use of solar panels of various types is carried out, their main characteristics that affect their service life are presented. The main types and causes of degradation of photovoltaic modules, which are associated with both mechanical and environmental influences, as well as with the influence of electrical quantities during the operation of solar panels, are considered in detail. The main conclusions about the most influential degradation factors are obtained, among which it is advisable to highlight the influence of temperature - both the external air temperature and the heating temperature of the solar panel itself - for further study. An analysis of current research on the study of the peculiarities of degradation of photovoltaic modules under the influence of various factors associated with both environmental influences and the influence of electrochemical processes directly in the panel system is carried out. Particular attention is paid

to studies of the effect of temperature on their performance. Preliminary experimental measurements of solar panel performance parameters at different light intensities and when the panel is heated in the range from 19 to 78 °C were carried out on the basis of a laboratory setup. Based on the data obtained, a graph of the dependence of the efficiency of a solar PV module on its surface temperature was constructed and it was found that the efficiency of the panel begins to decline actively after the temperature of its surface rises above 50-55°C. To confirm and detail the data obtained, the next task is to conduct similar studies with different types of solar panels and under different operating conditions. Also, the next step will be to further investigate the impact of ambient temperature on the efficiency of photovoltaic modules, as well as to find a specific link between the impact of this temperature on the heating of solar cells and, accordingly, to assess the impact of these parameters on the degradation of solar panels in general.

Keywords: *analysis, solar panel, efficiency, degradation, temperature, research*

References

1. Shavarsky V., Tysh E. Basic concepts of solar energy converter systems. Ternopil: Ternopil National Technical University named after Ivan Puluji, 2022. C. 98.
2. Zasekina T. M., Zasekin D. O. Physics (profile level, according to the curriculum of the author's team under the leadership of Loktev V. M.) Section 3. Optics. §47 Photoelectric effect: textbook for 11th grade of general secondary education. Kyiv: Orion Educational and Research Center, 2019. C. 222-229.
3. Streltsov O. A., Shkarupa A. O. Analysis of the features of solar cells. Kharkiv: Kharkiv National University of Radio Electronics, 2022. C. 89-94.
4. Investigation of characteristics and parameters of photovoltaic converters: master's thesis. Kryvyi Rih : Kryvyi Rih State Pedagogical University, 2021. 55 c.
5. Dikhtyarenko BR, Skursky MS Methods for estimating the parameters of solar panel degradation. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. C. 416-418.
6. Shapoval V. S., Shvedchykova I. O. Influence of environmental factors on the efficiency of solar panels. Kyiv: KNU Technologies and Design, 2019. C. 50-51.
7. Study of the influence of dust deposits on photovoltaic solar panels: Case of Nouakchott. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082621000569>.
8. Sustainability | Free-Full-Text | Delamination-and Electromigration-Related Failures in Solar Panels–A Review. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6882>.
9. Research of the process of restoration of degraded solar panels. Kyiv: KNU Technologies and Design, 2022. C. 27-34.
10. Degradation of solar panels. Kharkiv: Kharkiv National University of Radio Electronics, 2018. C. 152-153.
11. Sustainability | Free-Full-Text | A Comprehensive Evaluation on Types of Microcracks and Possible Effects on Power Degradation in Photovoltaic Solar Panels. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/16/6416>.
12. Sebastian Pingel, Torsten Geipel, Juliane Berghold. Initial Degradation of Industrial Silicon Solar Cells in Solar Panels. Germany, Tenenloye : Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2010. 7 p.
13. Degradation of solar panels: how and why does it happen? URL: <https://www.solargarden.-com.ua/degradatsiya-sonyachnyh-panelej-yak-i-chomu-tse-vidbuvayetsya/?movaUK=UK>.
14. Tsykh V. S., Kulchak A. M. Features of degradation of solar panels in operation: materials of the First International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Heat and Power Engineering and Environmental Protection", Poltava, 21-22.09.2023. C. 21-23.
15. Tsykh V. S., Kulchak A. M. Investigation of the influence of temperature on the efficiency of solar PV modules: materials of the IX International Scientific and Technical Conference "Energy Management: State and Prospects for Development", Kyiv, 22-24.11.2023. C. 17-18.
16. Chorna VO, Melnyk OE, Omelchenko OV, Nekrasov AV, Fed MG. Investigation of the influence of weather conditions on the efficiency of a photovoltaic installation. Kyiv: V. I. Vernadsky Taurida National University, 2018. C. 119-124.
17. Panchenko V. V., Kharin R. O. Investigation of the influence of solar panel degradation on the efficiency of a solar power plant. Kharkiv, Ukrainian State University of Railway Transport, 2023. C. 73-82.
18. Analysis of the influence of meteorological conditions on the efficiency of solar panels in Ivano-Frankivsk region. Ivano-Frankivsk: Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 2023. C. 99-107.
19. Dependence of solar panel efficiency on ambient temperature. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019. C. 574-575.
20. Mathematical modeling of the effect of temperature on the efficiency of a solar panel. Dnipro: Oles Honchar Dnipro National University, 2022. C. 48-58.

Надійшла: 12.01.2024

Received: 12.01.2024