

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**РАЗІНКОВ ВЛАДИСЛАВ ОЛЕКСІЙОВИЧ**

УДК 621.316

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ КОРИСНОЇ ДІЇ**  
**СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ**

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



В. О. Разінков

Науковий керівник

Шабовта Михайло Юрійович, кандидат технічних наук, доцент

## АНОТАЦІЯ

*Разінков В. О.* Методи та засоби підвищення коефіцієнту корисної дії сонячних фотоелектричних панелей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Національний університет «Одеська політехніка» МОН України, Одеса, 2025.

На сьогоднішній день в Україні склалася важка ситуація в енергетичній системі, яка спричинена масовим пошкодженням генеруючих елементів в наслідок ворожих атак. Разом з тим все більше і більше уряд країни та державна політика в галузі електроенергетика схиляється до побудови мереж з розподіленою генерацією. Найбільший пріоритет надається відновлювальним джерелам енергії, які мають низку переваг, зокрема найбільш актуальні в наш час це автономність, екологічність та стабільність роботи. Серед різних джерел відновлювальної енергетики найбільшого поширення отримують сонячні фотоелектричні панелі, які окрім всіх зазначених переваг також ще і можливість встановлення на будь яких відкритих ділянках місцевості. Відсоток електростанцій, які будуються на дахах будинків та комунальних установ з кожним роком стрімко зростає та має тенденцію до подальшого збільшення. Разом з тим робота фотоелектричних панелей залежить від багатьох факторів, які можуть спричинити і зменшення рівня генерації електричної енергії. Дані фактори можна мінімізувати, а також додатково використовувати і ту частину енергії, яка перетворюється у теплову при роботі фотоелектричної панелі, тим самим підвищуючи сумарні енергетичні показники фотоелектричних панелей.

Дисертація присвячена розробці методу підвищення енергетичного коефіцієнта корисної дії сонячних фотоелектричних панелей шляхом перетворення їх у гібридний колектор. Розроблений метод та концепція відноситься до розвитку ефективності відновлювальної енергетики, що

відповідає актуальним напрямам досліджень, які проводяться науковцями у всьому світі.

**Об'єктом дослідження** є процеси перетворення сонячної енергії у фотоелектричних панелях.

**Предметом дослідження** є метод підвищення сумарної енергетичної ефективності фотоелектричних панелей за рахунок їх перетворення у гібридний колектор.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано метод підвищення енергетичних характеристик фотоелектричних панелей шляхом перетворення їх у гібридний колектор, що відрізняється від існуючих конструкцій функціональним підходом до організаційної структури і дозволяє створити гібридний колектор на основі будь-якої фотоелектричної панелі.

2. Вперше запропоновано метод прогнозування енергетичних характеристик фотоелектричних панелей, які працюють в режимі гібридного колектору, що базується на комплексному розгляді факторів та чинників, що впливають на режим роботи.

3. Отримав подальшого розвитку метод оцінки енергетичної ефективності використання гібридних колекторів та фотоелектричних панелей, що працюють як гібридний колектор.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає у використанні запропонованих методів, що дозволяють оцінювати енергетичні характеристики та виконувати аналіз і порівняння ефективності роботи гібридних колекторів.

Результати та матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту зокрема при викладанні дисциплін «Енергетичні системи та комплекси», «Енергозбереження будівель та споруд», «Енергозберігаючі режими та технології», а також використовуються при формуванні тем кваліфікаційних робіт та конкурсних студентських наукових робіт.

Результати дисертаційної роботи були впроваджені при виконанні науково-дослідницької роботи №1878-55 на тему: «Розроблення проектних рішень з будівництва та приєднання фотоелектричних станцій», яка була виконана у 2023 році, а також у науково-дослідницькій роботі №1871-55 на тему «Обґрунтування та розроблення системи внутрішнього електропостачання і комерційного обліку електроенергії адміністративної будівлі за адресою м. Одеса, вул. Академіка Глушко, 27 з застосуванням фотоелектричної станції», яка була виконана у 2022 р.

Результати дисертаційної роботи впроваджені ТОВ «ТК ПРОЕКТ», а саме використані при розробці власної проектної документації для прогнозування енергетичних показників дахових сонячних електростанцій, ТОВ «Південна енергетична компанія» використовує результати дисертаційного дослідження для оцінки економічних та енергетичних показників проектів геліоенергетики.

**У вступі** наводиться актуальність представленої роботи, формулюється основна мета даної роботи та задачі дослідження, висвітлюються основні засади впровадження та розвитку відновлювальної енергетики, наводиться інформація про апробацію отриманих результатів дисертаційного дослідження, загальну структуру роботи а також інформація про публікації автора за темою дисертації.

**У першому розділі** на підставі відкритих літературних джерел проводиться аналіз існуючих фотоелектричних панелей з урахуванням особливостей їх технологічного процесу виробництва, а також з зазначенням основних переваг та недоліків різних конструкцій. Основним недоліком, який був виокремлений у всіх відомих конструкціях фотоелектричних панелей є залежність рівня генерації електричної енергії від робочої температури напівпровідникових елементів. Шляхом аналізу літературних джерел було встановлено, що одним із найбільш сучасних та перспективних методів, який дозволяє частково ліквідувати цей недолік і збільшити сумарну ефективність сонячних фотоелектричних панелей є гібридний колектор – пристрій, який

конструктивно поєднує у собі дві частини що дозволяють одночасно отримувати як електричну так і теплову енергію. З огляду конструкцій гібридних колекторів було встановлено, що науковці зосередилися на створенні повітряних та водяних гібридних колекторів, в свою чергу використання повітряних гібридних колекторів не є доцільним для нашого помірною клімату, і викликає певні складнощі в частині використання теплоносія, в той час як водяні є більш перспективні. Існуючі конструкції водяних гібридних колекторів також мали ряд недоліків пов'язаних з неможливістю їх впровадження на існуючих фотоелектричних панелях, а також пов'язані з температурним режимом, який здебільшого спирався на температуру теплоносія, яку намагаються виводити на значення необхідне для безпосереднього водозабору.

**У другому розділі** проведено дослідження різних методів оцінки надходження сонячної інсоляції на поверхню. Оскільки інтенсивність сонячної радіації на поверхні фотоелектричної панелі є ключовим фактором, який впливає на температуру кремнієвих елементів та рівень генерації електричної енергії від фотоелектричних панелей тому визначення найбільш точних значень сонячної інсоляції є однією із пріоритетних задач для проведення подальшого коректного дослідження. Насамперед були проаналізовані всі впливові фактори, які впливають на рівень сонячної інсоляції протягом року та обрані для аналізу декілька емпіричних моделей, що базуються на різних метеорологічних даних, а також обрано три точні моделі оцінки погодинних значень надходжень сонячної радіації на поверхню. Розрахунок за цими моделями відбувався на основі метеорологічних даних, які були отримані з відкритих інформаційних ресурсів, розрахунок точних моделей виконувався для географічних координат міста Одеса. За результатами прорахунків за всіма моделями було визначено рівні сонячної інсоляції для кожного дня року, а також отримані результати були співставленні з даними, які наводяться в Національному управлінні з авіації та космічного простору та експериментальними даними, які були отримані за допомогою

метеорологічного посту встановленого на території Національного університету «Одеська політехніка». За результатами співставлення було визначено, що найбільш точною, як відповідно до даних НАСА так і у відповідності до експериментальних даних є модель Hottel, яка дає найменшу похибку усереднених значень.

У **третьому розділі** наводиться детальний опис конструкції пристрою, який реалізує метод підвищення сумарної енергетичної ефективності сонячних фотоелектричних панелей за рахунок їх перетворення у гібридний колектор, основні складові частини, принципи та механізми його реалізації. Відповідно до конструктивних особливостей проводиться аналіз можливого зменшення надходження сонячної радіації на напівпровідникові елементи за рахунок встановлення додаткових шарів, які складаються з неідеально прозорих матеріалів. В результаті дослідження було встановлено, що при товщинах додаткових шарів, які концептуально можуть використовуватися в даному пристрої втрати інтенсивності сонячної радіації у видимому спектрі складають десяті долі  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , що є меншим за відносну похибку розрахунків при моделюванні сонячних надходжень, а отже встановлення даного пристрою суттєво не повинно впливати на величину інсоляції на поверхні напівпровідникових елементів фотоелектричної панелі. Оскільки даний пристрій не створює впливу на роботу фотоелектричної панелі то в подальшому проводиться детальне моделювання роботи лише фотоелектричної панелі. В якості об'єкта моделювання застосовується кремнієва фотоелектрична панель. За результатами моделювання було отримано  $I-V$  та  $P-V$  характеристики кремнієвої фотоелектричної панелі, а також моделювання роботи даної панелі при різних температурах та різних рівнях інсоляції, дозволили вирахувати середній температурний коефіцієнт потужності моделі який склав  $0,55\%/K$ , даний коефіцієнт є дуже близьким до реальних показників, які зазначаються виробниками, хоча практичні значення даного показника коливаються в залежності від хімічного складу матеріалу та виробника.

Наступним етапом було визначено максимальну температуру напівпровідникових елементів фотоелектричної частини за рахунок балансної моделі, в результаті було встановлено, що на основі даних про сонячні надходження за моделлю Hottel, максимальна температура панелі складає трохи більше 60 °С, що є досить адекватним показником. Також отримані результати з балансної моделі було співставлені з експериментальними даними для декількох днів, з урахуванням особливостей напівпровідникових елементів, зазначена модель показала відносну невелику похибку з експериментальними даними.

Для перевірки розподілу теплової енергії вздовж фотоелектричної панелі було промодельована її робота з використання зазначеної конструкції пристрою, в результаті моделювання було визначено, що теплоносій, який буде циркулювати в пристрої здатен відводити значну частину теплової енергії.

Також наводиться опис проведеного експерименту з двома фотоелектричними панелями однаковими за конструкцією, які працюють в одному і тому ж місці але на поверхню однієї з цих панелей було встановлено пристрій зазначеної конструкції. Результати експерименту показали, що очікуваний ефект від використання даного методу цілком можливий.

**У четвертому розділі** більш детально розглядається можлива сфера застосування даного пристрою з визначенням робочої схеми відведення теплоносія від створеного гібридного колектору. Для розрахунку економічного ефекту приймається реальний об'єкт розташований в місті Одеса з існуючою даховою сонячною електростанцією.

Окрім безпосереднього збільшення генерації електричної енергії та можливості додаткового отримання теплової енергії розглядається можливість отримання ефекту за рахунок зменшення ризику утворення PID деградації фотоелектричних панелей, основним чинником якої є здебільшого температурні коливання поверхні, як при використанні пристрою суттєво зменшаються.

Проводиться економічна оцінка реалізації даного методу за допомогою запропонованого пристрою виходячи з двох основних аспектів, це собівартість пристрою і питома вартість одиниці отриманої енергії. За результатами аналізу ринку матеріалів створення даного пристрою не є особливо капітал витратним, але з урахуванням економії енергії та ставки дисконту на рівні 20% термін окупності складає 9,5 років. Даний показник не є сильно привабливим проте з урахуванням стрімкої інфляції на енергоносії він може стрімко зменшуватися. Аналіз питомої вартості одиниці енергії проводився для порівняння з існуючим гібридним колектором, який представлений на ринку, за допомогою зазначених вище моделей було порівняно кількість енергії, яку вони можуть згенерувати за 20 років, і ця енергія була порівняна з питомою вартістю обох конструкцій, в результаті пропонується система виявилась майже в два рази дешевшою за існуючу конструкцію, яка представлена на ринку.

**Ключові слова:** *електрична енергія, теплова енергія, фотоелектричні сонячні панелі, гібридний колектор, ефективність, генерація, економія, відновлювальні джерела енергії, оптимальний режим роботи, максимальна потужність, енергетичні характеристики, втрати електричної енергії, температурний режим панелей, сонячна інсоляція.*

### Список публікацій здобувача

#### *Публікації в яких опубліковано основні наукові результати дисертації*

1. В. О. Разінков, «Визначення інтенсивності сонячної радіації, як ключового фактора прогнозування роботи фотоелектричних панелей» Вісник ВПІ вип. 4, 2024. с. 47-53 (*Наукове фахове видання України (Категорія "Б")*).

URL:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53>

2. В. О. Разінков, В. В. Капалін, «Метод підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних панелей за рахунок перетворення їх у гібридний колектор», Електротехнічні та комп'ютерні системи вип. 41(117) с. 61-68 (*Наукове фахове видання України (Категорія "Б")*).

URL:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53>

3. М. Ю. Шабовта, В. О. Разінков, «Оцінка енергетичних, температурних та економічних характеристик гібридних колекторів», Електричні та комп'ютерні системи №36 (112). 2022. с.18-26 (*Наукове фахове видання України (Категорія "Б")*).

URL:<https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.03>

4. В. О. Разінков, «Підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних електричних панелей за рахунок перетворення їх в гібридний колектор» Електричні та комп'ютерні системи №34 (110). 2021. с.34-38 (*Наукове фахове видання України (Категорія "Б")*).

URL:<https://doi.org/10.15276/eltecs.34.110.2021.4>

### ***Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

1. В. О. Разінков, В. О. Суворов, «Перспективи використання геліоенергетики для енергопостачання в місті Одеса», Вісник ВПІ вип. 6. 2022 с. 29-36 (*Наукове фахове видання України (Категорія "Б")*).

URL:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-29-36>

2. В. О. Разінков, «Оглядовий аналіз основних видів сонячних елементів та виявлення шляхів підвищення їх ефективності роботи та застосування» Електронний журнал «Альманах науки». Вип. № 5 (26). 2019. с. 23-25.

3. Razinkov V. O. Generation of electricity by photovoltaic panels under conditions approximate to real. International Workshop of Scientific Students' Papers, 17<sup>th</sup> Edition. 2023.

URL: <https://elstud.webnode.ro/editii-elstud/2023/>

4. Разінков В. О., Разінков Н. О. Теплові процеси сонячних фотоелектричних панелей. X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)». 2023.

URL:<http://econference.nubip.edu.ua/index.php/pmeas/pmeas2023/index>

5. Разінков В. О. Волощук С. О. Дослідження факторів що впливають на генерацію сонячних панелей «Perspectives of contemporary science: theory and

practice. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference.» Lviv, Ukraine. 2024.

URL:<https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/12/PERSPECTIVES-OF-CONTEMPORARY-SCIENCE-THEORY-AND-PRACTICE-9-11.12.24.pdf>

### *Патенти за темою дисертації*

1. Патент України на корисну модель № 148479 «Пристрій для підвищення ефективності використання сонячних фотоелектричних модулів» зареєстровано 11.08.2021 р. дата публікації 11.08.2021 Бюл. № 32.

2. Патент України на корисну модель № 152350 «Пристрій для підвищення ККД сонячних панелей з покращеними характеристиками» зареєстровано 11.01.2023 р. дата публікації 11.01.2023 Бюл. № 2.

### **ABSTRACT**

*Razinkov V. O.* Methods and means of increasing the efficiency of solar photovoltaic panels. – Qualification scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 – Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. – Odesa National Polytechnic University , Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

Currently, Ukraine is experiencing a challenging situation in its energy system due to the widespread damage to generating elements caused by hostile attacks. Consequently, the government and state policy in the field of electric power are increasingly inclined toward the development of networks with distributed generation. Renewable energy sources, which offer several advantages, particularly autonomy, environmental friendliness, and operational stability, are given the highest priority. Among various renewable energy sources, solar photovoltaic panels are gaining the most traction. They possess the unique advantage of being installable on any open land areas. The percentage of power plants built on rooftops of houses and communal facilities is rapidly increasing and is expected to continue to rise.

However, the performance of photovoltaic panels depends on many factors that can reduce the level of electricity generation. These factors can be minimized, and the additional energy that is converted into heat during the operation of photovoltaic panels can be utilized, thereby improving the overall energy performance of the panels.

The dissertation is dedicated to developing a method for increasing the energy efficiency of solar photovoltaic panels by transforming them into a hybrid collector. The developed method and concept relate to the advancement of renewable energy efficiency, which aligns with current research trends pursued by scientists worldwide.

**The object** of the study is the processes of solar energy conversion in photovoltaic panels.

**The subject** of the study is a method for increasing the total energy efficiency of photovoltaic panels by converting them into a hybrid collector.

**The scientific novelty** of the results obtained is as follows:

1. For the first time, a method for increasing the energy characteristics of photovoltaic panels by converting them into a hybrid collector has been proposed, which differs from existing designs in a functional approach to the organizational structure and allows you to create a hybrid collector based on any photovoltaic panel.

2. For the first time, a method for predicting the energy characteristics of photovoltaic panels operating in the hybrid collector mode has been proposed, which is based on a comprehensive consideration of factors and factors affecting the operating mode.

3. A method for assessing the energy efficiency of using hybrid collectors and photovoltaic panels operating as a hybrid collector has been further developed.

**The practical significance** of the results obtained lies in the use of the proposed methods that allow you to evaluate the energy characteristics and perform analysis and comparison of the efficiency of hybrid collectors.

The results and materials of the dissertation are used in the educational process of the Department of Power Supply and Energy Management, particularly in

teaching courses such as «Energy Systems and Complexes», «Energy Efficiency in Buildings and Structures», «Energy-Saving Modes and Technologies». They are also used in forming the topics of qualification works and student scientific competitions.

The dissertation results were implemented during the research project No. 1878-55 on the topic: «Development of design solutions for the construction and connection of photovoltaic stations», carried out in 2023, and in the research project No. 1871-55 on the topic «Justification and development of an internal power supply and commercial metering system for an administrative building at 27 Akademika Glushko St., Odesa, using a photovoltaic station», completed in 2022.

The results of the dissertation work were implemented by LLC «TK PROJECT», namely used in the development of its own design documentation for predicting the energy performance of rooftop solar power plants, LLC «Southern Energy Company» uses the results of the dissertation research to assess the economic and energy performance of solar energy projects.

**In the introduction** the relevance of the presented work, formulates the main goal of the work and research tasks, highlights the main principles of renewable energy development and implementation, provides information on the approbation of the dissertation research results, the overall structure of the work, and information on the author's publications on the dissertation topic.

**In the first chapter** analyzes existing photovoltaic panels based on open literature sources, taking into account the features of their technological production process and indicating the main advantages and disadvantages of various designs. The main disadvantage highlighted in all known photovoltaic panel designs is the dependence of electricity generation levels on the operating temperature of semiconductor elements. Literature analysis has shown that one of the most modern and promising methods for partially eliminating this disadvantage and increasing the overall efficiency of solar photovoltaic panels is the hybrid collector – a device that structurally combines two parts, allowing for the simultaneous generation of both electrical and thermal energy. From the review of hybrid collector designs, it was found that scientists focused on creating air and water hybrid collectors, with the

latter being more suitable for our temperate climate due to the complexities associated with using air as a heat transfer medium.

**In the second chapter** investigates various methods for assessing solar insolation on the surface. As the intensity of solar radiation on the surface of the photovoltaic panel is a key factor affecting the temperature of silicon elements and the level of electricity generation, determining the most accurate solar insolation values is one of the priority tasks for conducting further correct research. Several empirical models, based on different meteorological data, were analyzed, and three accurate models for estimating hourly solar radiation were chosen. The calculations for empirical models were based on meteorological data from open information resources, and the accurate models were calculated for the geographical coordinates of Odesa. The results for all models provided daily solar insolation levels for each day of the year, and these results were compared with data from NASA and experimental data obtained using a meteorological post at the Odesa National Polytechnic University. The comparison showed that the Hottel model is the most accurate, as it has the smallest error in average values.

**In the third chapter** provides a detailed description of the device design that implements the method for increasing the overall energy efficiency of solar photovoltaic panels by transforming them into a hybrid collector. The section discusses the main components, principles, and mechanisms of its implementation. The analysis of potential reductions in solar radiation on semiconductor elements due to the installation of additional layers made of non-ideal transparent materials was also conducted. The analysis concluded that the additional layers' thickness, which can conceptually be used in this device, causes minimal solar radiation losses in the visible spectrum, thus the installation of this device should not significantly affect the insolation on the semiconductor elements of the photovoltaic panel. Given the lack of negative impact on the photovoltaic panel's performance, detailed modeling of the panel's operation was carried out. A silicon photovoltaic panel was chosen for modeling. The results of the modeling provided I-V and P-V characteristics of the silicon photovoltaic panel and allowed calculating the average

temperature coefficient of power, which was 0.55%/K, a value very close to real indicators specified by manufacturers.

The next step involved determining the maximum temperature of the semiconductor elements of the photovoltaic part based on the balance model. The results indicated that, according to Hottel's solar input data, the maximum panel temperature is slightly over 60°C, a fairly adequate indicator. The balance model's results were compared with experimental data for several days, considering the semiconductor elements' specifics. The model showed a relatively small error compared to the experimental data.

To verify the distribution of thermal energy along the photovoltaic panel, its operation using the specified device design was modeled. The modeling determined that the coolant circulating in the device can remove a significant portion of the thermal energy.

Additionally, an experiment was conducted with two identical photovoltaic panels operating in the same location, with the specified device installed on one of the panels. The experiment results showed that the expected effect from using this method is entirely possible.

**In the fourth chapter** explores the possible application scope of this device in more detail, defining the working scheme for the coolant extraction from the hybrid collector. To calculate the economic effect, a real object located in Odesa with an existing rooftop solar power plant was taken as a basis.

In addition to directly increasing electricity generation and obtaining additional thermal energy, the possibility of reducing the risk of PID degradation of photovoltaic panels, primarily caused by surface temperature fluctuations, is considered. The economic assessment of the method's implementation using the proposed device is conducted based on two main aspects: the device's cost and the specific cost of energy produced. The market analysis of materials for the device's construction shows that it is not particularly capital-intensive. However, considering the saved energy and a discount rate of 20%, the payback period is 9.5 years. This indicator is not particularly attractive, but given the rapid inflation of energy prices,

it can quickly decrease. The analysis of the specific cost of energy was conducted to compare with the existing hybrid collector available on the market. Using the models mentioned above, the amount of energy generated over 20 years was calculated and compared with the specific cost of both designs. As a result, the proposed system was found to be almost twice as cheap as the existing market design.

**Keywords:** electrical energy, thermal energy, photovoltaic solar panels, hybrid collector, efficiency, generation, savings, renewable energy sources, optimal operating mode, maximum power, energy characteristics, electrical energy losses, temperature regime of panels, solar insolation.

### **List of publications on topic of the dissertation**

#### ***Publications in which the main scientific results of the dissertation were published***

1. V. O. Razinkov, «Determination of solar radiation intensity as a key factor in predicting the operation of photovoltaic panels,» Bulletin of the VPI Vol. 4, 2024. p. 47-53 (Scientific professional publication of Ukraine (Category «B»)).

[URL:https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53](https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53)

2. V. O. Razinkov, V. V. Kapalin, «Method for increasing the energy efficiency of photovoltaic panels by converting them into a hybrid collector», Electrical and Computer Systems, vol. 41(117), pp. 61-68 (Scientific professional publication of Ukraine (Category «B»)).

[URL:https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53](https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53)

3. M. Yu. Shabovta, V. O. Razinkov, «Evaluation of energy, temperature and economic characteristics of hybrid collectors», Electrical and Computer Systems No. 36 (112). 2022. p. 18-26 (Scientific Professional Publication of Ukraine (Category «B»)).

[URL:https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.03](https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.03)

4. V. O. Razinkov, «Increasing the Efficiency of Solar Electric Panels by Converting Them into a Hybrid Collector» Electrical and Computer Systems No. 34 (110). 2021. p. 34-38 (Scientific Professional Publication of Ukraine (Category «B»)).

[URL:https://doi.org/10.15276/eltecs.34.110.2021.4](https://doi.org/10.15276/eltecs.34.110.2021.4)

***Publications certifying the approval of the dissertation materials***

1. V. O. Razinkov, V. O. Suvorov, «Prospects for the use of solar energy for energy supply in the city of Odesa», Bulletin of the VPI, No. 6, 2022, p. 29-36 (Scientific professional publication of Ukraine (Category «B»)).

[URL:https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-29-36](https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-29-36)

2. V. O. Razinkov, «Review analysis of the main types of solar cells and identification of ways to increase their efficiency and application» Electronic journal «Almanac of Science». Issue No. 5 (26). 2019. pp. 23-25.

3. Razinkov V. O. «Generation of electricity by photovoltaic panels under conditions approximate to real». International Workshop of Scientific Students' Papers, 17th Edition. 2023.

URL: <https://elstud.webnode.ro/editii-elstud/2023/>

4. Razinkov V. O., Razinkov N. O. «Thermal processes of solar photovoltaic panels». X International Scientific and Technical Conference «Problems of Modern Energy and Automation in the Environmental Management System (Theory, Practice, History, Education)». 2023.

[URL:http://econference.nubip.edu.ua/index.php/pmeas/pmeas2023/index](http://econference.nubip.edu.ua/index.php/pmeas/pmeas2023/index)

5. Razinkov V. O. Voloshchuk S. O. «Research on Factors Affecting the Generation of Solar Panels» «Perspectives of Contemporary Science: Theory and Practice. Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference.» Lviv, Ukraine. 2024.

[URL:https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/12/PERSPECTIVES-OF-CONTEMPORARY-SCIENCE-THEORY-AND-PRACTICE-9-11.12.24.pdf](https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/12/PERSPECTIVES-OF-CONTEMPORARY-SCIENCE-THEORY-AND-PRACTICE-9-11.12.24.pdf)

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	20
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА ГІБРИДНИХ КОЛЕКТОРІВ.....	26
1.1 Використання сонячної енергії та її основні елементи .....	26
1.1.1 Монокристалічні фотоелектричні панелі .....	30
1.1.2 Полікристалічні фотоелектричні панелі .....	33
1.1.3 Плівкові фотоелектричні панелі .....	34
1.1.4 Аморфні сонячні панелі.....	36
1.2 Робота фотоелектричних панелей .....	38
1.3 Підвищення ефективності фотоелектричних панелей за рахунок комбінованого виробництва енергії.....	44
1.4 Особливості існуючих гібридних колекторів .....	49
Висновки до розділу 1 .....	52
РОЗДІЛ 2 ВЛИВОВІ ФАКТОРИ ТА МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	53
2.1 Базові геометричні величини руху землі .....	55
2.2. Позаземна сонячна радіація .....	57
2.3 Моделі сонячних надходжень на Земну поверхню.....	58
2.3.1 Аналіз існуючих моделей .....	58
2.3.1.1 Моделі, що базуються на сонячному випромінюванні.....	58
2.3.1.2. Моделі що базуються на хмарності.....	60
2.3.1.3 Моделі що базуються на температурі .....	61
2.4 Моделі точного прогнозування сонячної радіації.....	62
2.4.1 Модель ASHARE 2001 .....	62
2.4.2 Модель Hottel.....	68
2.4.3 Модель ASHARE 2009.....	71
2.5 Перевірка отриманих результатів .....	73
Висновки до розділу 2 .....	80

	18
РОЗДІЛ 3 ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ .....	81
3.1 Опис пристрою .....	81
3.2 Зменшення світлового потоку при використанні пристрою .....	86
3.3 Моделювання роботи фотоелектричної панелі .....	90
3.4 Моделювання теплових процесів роботи фотоелектричної панелі з пристроєм .....	98
3.5 Моделювання теплових процесів роботи фотоелектричної панелі з урахуванням встановлення пристрою .....	105
3.6 Проведення експерименту .....	108
РОЗДІЛ 4 ПЕРСПЕКТИВИ, ПЕРЕВАГИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО ПРИСТРОЮ .....	116
4.1 Схема використання теплоносія .....	116
4.2 Переваги використання пристрою для перетворення фотоелектричних панелей у гібридний колектор .....	119
4.3 Економічна оцінка використання пристрою .....	122
4.4 Собівартість спорудження пристрою .....	129
4.5 Підвищення ККД сонячних фотоелектричних панелей .....	135
Висновки до розділу 4 .....	136
ВИСНОВКИ .....	138
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	143
ДОДАТОК А Документи про впровадження результатів дослідження .....	154
ДОДАТОК Б Список публікацій здобувача .....	159

### **Перелік умовних скорочень**

ЕЕ – електрична енергія

ГВП – гаряче водопостачання

ККД – коефіцієнт корисної дії

СФП – сонячні фотоелектричні панелі

СЕС – сонячна електрична станція

## ВСТУП

За нашого часу електрична енергія отримала дуже широке розповсюдження за рахунок своєї універсальності використання та зручності транспортування. Стрімкий розвиток науково-технічного прогресу тісно пов'язав життя та діяльність людини з використанням та перетворенням електричної енергії. Разом з тим таке широке використання та розповсюдження поставило перед людством значні проблеми та задачі, які намагаються вирішити всі науковці світу. Однією з найбільших проблем стало використання природних копалин для отримання електроенергії, що в свою чергу спричиняє суттєві викиди двоатомних та трьохатомних газів в атмосферу, які в свою чергу головним чином впливають на утворення парникового ефекту та як наслідок глобального потепління. Разом з негативними наслідками впливу на клімат, природні ресурси розподілені територією планети вкрай нерівномірно через що у новому ХХІ столітті стають ще і джерелом провадження зовнішньої політики країн які володіють значними запасами цих копалин. Однак навіть, якщо не враховувати останній чинник сумарні світові запаси природних копалин при сучасному рівні енергоспоживання дуже стрімко вичерпуються та в найближчому майбутньому можуть стати вкрай дефіцитними, що призведе до негативних наслідків у світі. Разом з тим досвід України останніх років показав, що об'єкти енергетичної інфраструктури є також пріоритетними цілями для ворожих атак, оскільки перебої в електропостачанні можуть суттєво сповільнювати технологічні процеси виготовлення необхідної для країни продукції, а також чинити психологічний тиск на населення.

Одним із перспективних напрямків розвитку енергосистеми, які майже повністю виключають негативний вплив всіх перерахованих явищ є побудова розподіленої генерації на основі відновлюваних джерел енергії. В цьому контексті розробляється багато урядових програм для стимулювання розвитку побудови дахових СЕС, а також стратегічні плани розвитку енергосистеми які

включають щорічне збільшення частки генерації від відновлювальних джерел енергії.

Разом з задачею збільшення обсягів генерації науковцями вирішується і проблема підвищення ефективності використання сонячних фотоелектричних панелей, що призводить до отримання більших обсягів енергії при використанні тих самих площ. В даній роботі розглядається можливість підвищення ефективності використання сонячних фотоелектричних панелей за рахунок перетворення їх у гібридний колектор, що дозволить підвищити сумарний енергетичний ККД. За рахунок стабілізації температурного режиму фотоелектричної панелі сумарно зменшуються обсяги втрат, які спричинені перевищенням температури понад нормованої, а разом із збільшенням генерації електричної енергії додатково ще отримується тепла енергія у вигляді підігрітого теплоносія, який може бути використаний для системи гарячого водопостачання, що при використанні фотоелектричних панелей на дахових СЕС є досить перспективним оскільки в кожному житловому будинку та комунальній будівлі обов'язково є система гарячого водопостачання, яка в більшості випадків реалізована на базі електричних водонагрівачів.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Роботу виконано у чіткій відповідності до ключових цілей та задач, які представлені в «енергетичній стратегії України на період до 2030 р.» схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України №1071 від 24.07.2013 р., у відповідності до Закону України «Про альтернативні джерела енергії» зокрема з урахуванням статі 3 «Про науково-технічне забезпечення розвитку альтернативної енергетики та її популяризації ...», а також у відповідності до Директиви Європейського Парламенту і Ради 2012/27/ЄС від 25 жовтня 2012 року про енергоефективність, внесення змін до директив 2009/125/ЄС і 2010/30/ЄС та про скасування директив 2004/8/ЄС і 2006/32/ЄС. Також дана робота відповідає пріоритетним напрямкам науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська політехніка», а саме напряму «Енергія та енергоефективність».

Роль автора у контексті зазначених програм і планів, полягає у дослідженні та створенні зрозумілих та функціональних моделей, методів та пристроїв, які дозволять підвищити енергетичну ефективність використання фотоелектричних панелей, з використанням сучасних програмних засобів та технологій, що дозволить популяризувати поширення відновлювальної енергетики за рахунок легких та доступних оцінок.

**Мета дослідження** дисертаційної роботи полягає у підвищенні ефективності використання фотоелектричних панелей за рахунок перетворення їх у гібридний колектор з використанням запропонованого методу.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі **завдання**:

1. Проведено огляд та аналіз існуючого стану елементів сонячної енергетики, недоліків в роботі фотоелектричних панелей, методів їх вирішення, існуючих рішень та наукових розробок, які застосовуються для усунення визначених недоліків.

2. Проведено вибір методів прогнозування факторів, що впливають на роботу фотоелектричних панелей, а саме сонячної радіації на поверхні Землі та температури фотоелектричної панелі. Обраний метод для визначення рівня генерації електричної енергії з урахуванням даних факторів та метод визначення розповсюдження теплової енергії в шарах гібридного колектора.

3. Розроблено метод перетворення фотоелектричної панелі у гібридний колектор та запропоновано конструктивне виконання такого колектору, експериментально доведено ефективність даного методу.

4. Проведена комплексна оцінка ефективності використання запропонованого методу підвищення енергетичних характеристик сонячних панелей за рахунок перетворення їх у гібридний колектор.

**Методи дослідження.**

При побудові моделей розповсюдження теплової енергії використовувалися методи аналізу загальної термодинаміки, для побудови моделей роботи фотоелектричних елементів використовувалися методи

теоретичної електротехніки та напівпровідникових елементів. Для перевірки експериментальних даних з моделями, що використовуються в роботі використовувалися методи статистичної обробки інформації, для оцінки ефективності використання методи економічного прогнозування.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано метод підвищення енергетичних характеристик фотоелектричних панелей шляхом перетворення їх у гібридний колектор, що відрізняється від існуючих конструкцій функціональним підходом до організаційної структури і дозволяє створити гібридний колектор на основі будь-якої фотоелектричної панелі.

2. Вперше запропоновано метод прогнозування енергетичних характеристик фотоелектричних панелей, які працюють в режимі гібридного колектора, що базується на комплексному розгляді факторів та чинників, що впливають на режим роботи.

3. Отримав подальшого розвитку метод оцінки енергетичної ефективності використання гібридних колекторів та фотоелектричних панелей, що працюють як гібридний колектор.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає в використанні запропонованих методів, що дозволяють оцінювати енергетичні характеристики та виконувати аналіз і порівняння ефективності роботи гібридних колекторів.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота містить результати дослідження, які було отримано самостійно. Основні розробки, в тому числі й ті що описують та характеризують наукову новизну, відображають практичне значення виконані здобувачем особисто. В роботах у співавторстві та без них, результати яких були представлені на конференціях: в [1] – представлена розрахункова модель, яка дозволяє прогнозувати генерацію електричної енергії від фотоелектричної панелі в довільний момент часу, в [2] – відображені результати експерименту вимірювання та зміни робочої температури поверхні фотоелектричної панелі, а також результати були

представлені в друкованих фахових виданнях категорії «Б» в [3] – наведено загальна концепція методу підвищення ефективності використання фотоелектричних панелей шляхом перетворення їх у гібридний колектор та проведений аналіз можливих результатів, в [4] – проведено аналіз методів прогнозування надходження сонячної радіації на поверхню та визначення оптимальних орієнтацій, в [5] – представлено детальний опис методу підвищення ефективності роботи фотоелектричних панелей з врахуванням енергетичних характеристик під час роботи фотоелектричних панелей та економічних оцінок.

### **Апробація результатів роботи.**

1. В. О. Разінков, 2023 «Генерація електричної енергії фотоелектричними панелями в умовах наближених до реальних» International Workshop of Scientific Student`s Papers –ELSTUD `23. – Сучава 2023.

<https://elstud.webnode.ro/editii-elstud/2023/>

2. В. О. Разінков, Н. О. Разінков «Теплові процеси сонячних фотоелектричних панелей» Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)». – Київ 2023

<http://econference.nubip.edu.ua/index.php/pmeas/pmeas2023/index>

3. В. О. Разінков, 2021 «Підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних електричних панелей за рахунок перетворення їх в гібридний колектор» Електричні та комп'ютерні системи №34 (110) с.34-38 (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")). <https://doi.org/10.15276/eltecs.34.110.2021.4>

4. В. О. Разінков, В. О. Суворов, 2022 «Перспективи використання геліоенергетики для енергопостачання в місті Одеса», Вісник ВПІ вип. 6, с. 29-36 (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-29-36>

5. М. Ю. Шабовта, В. О. Разінков, 2022 «Оцінка енергетичних, температурних та економічних характеристик гібридних колекторів»,

Електричні та комп'ютерні системи №36 (112) с.18-26 (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

<https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.03>

### **Публікації.**

1. В. О. Разінков, «Визначення інтенсивності сонячної радіації, як ключового фактора прогнозування роботи фотоелектричних панелей» Вісник ВПІ вип. 4, 2024. с. 47-53 (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

[URL:https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53](https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53)

2. В. О. Разінков, В. В. Капалін, «Метод підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних панелей за рахунок перетворення їх у гібридний колектор», Електротехнічні та комп'ютерні системи вип. 41(117) с. 61-68 (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

[URL:https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53](https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53)

3. М. Ю. Шабовта, В. О. Разінков, «Оцінка енергетичних, температурних та економічних характеристик гібридних колекторів», Електричні та комп'ютерні системи №36 (112). 2022. с.18-26 (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

[URL:https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.03](https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.03)

4. В. О. Разінков, «Підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних електричних панелей за рахунок перетворення їх в гібридний колектор» Електричні та комп'ютерні системи №34 (110). 2021. с.34-38 (Наукове фахове видання України (Категорія "Б")).

[URL:https://doi.org/10.15276/eltecs.34.110.2021.4](https://doi.org/10.15276/eltecs.34.110.2021.4)

### **Структура і обсяг дисертації.**

Дисертаційна робота загальним обсягом 161 сторінок з основною частиною 142 сторінок, яка складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та анотації списку використаних джерел з 98 найменування і 2 додатків на 8 сторінках; містить 56 рисунків і 8 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА ГІБРИДНИХ КОЛЕКТОРІВ

#### 1.1 Використання сонячної енергії та її основні елементи

Використання сонячної енергії для енергопостачання споживачів є досить актуальним питанням в усьому світі, але незважаючи на це у світі склалося лише дві основні тенденції отримання енергії від сонця, а саме:

- Фотоелектричні елементи, які перетворюють енергію сонця безпосередньо в електричну енергію за рахунок фотоефекту;
- Термодинамічні елементи, отримують та абсорбують, тепло від сонця при високій температурі, а потім відбувається процес перетворення цього тепла в механічну та електричну енергію за допомогою термодинамічного циклу двигуна, з'єданого з електричним генератором.

В свою чергу потужність другого виду електричних станцій більша, ніж фотоелектричних станцій [1]. Однак термодинамічні елементи потребують використання теплової енергії з великими питомими показниками температури, так наприклад термодинамічні електростанції баштового типу працюють в діапазоні температур приймальної поверхні на рівні від 538°C до 1482°C [2], тому для їх нормальної експлуатації використовуються фокусуючі поверхні, які збільшують щільність теплового потоку. Технологічний процес таких електростанцій багатоступеневий та складний, і подібний до класичного варіанту отримання електричної енергії, коли пара обертає турбіну на валу з якою знаходиться електричний генератор. Окрім цього термодинамічні електростанції з поверхнями, що фокусують сонячне випромінювання сприймають лише пряму сонячну радіацію, і у світовій практиці використовують дуже рідко [3]. Для наших широт пряма сонячна радіація складає близько 40% і має значні сезонні коливання, що суттєво знижує ефективність використання даного типу електростанцій, і робить його економічно недоцільним.

Тому значно більшого поширення отримали технології фотовольтаїки, які дозволяють безпосередньо перетворювати сонячне випромінювання у електричну енергію. Світові тенденції нарощування потужностей фотоелектричних панелей приведені на рисунку 1.1

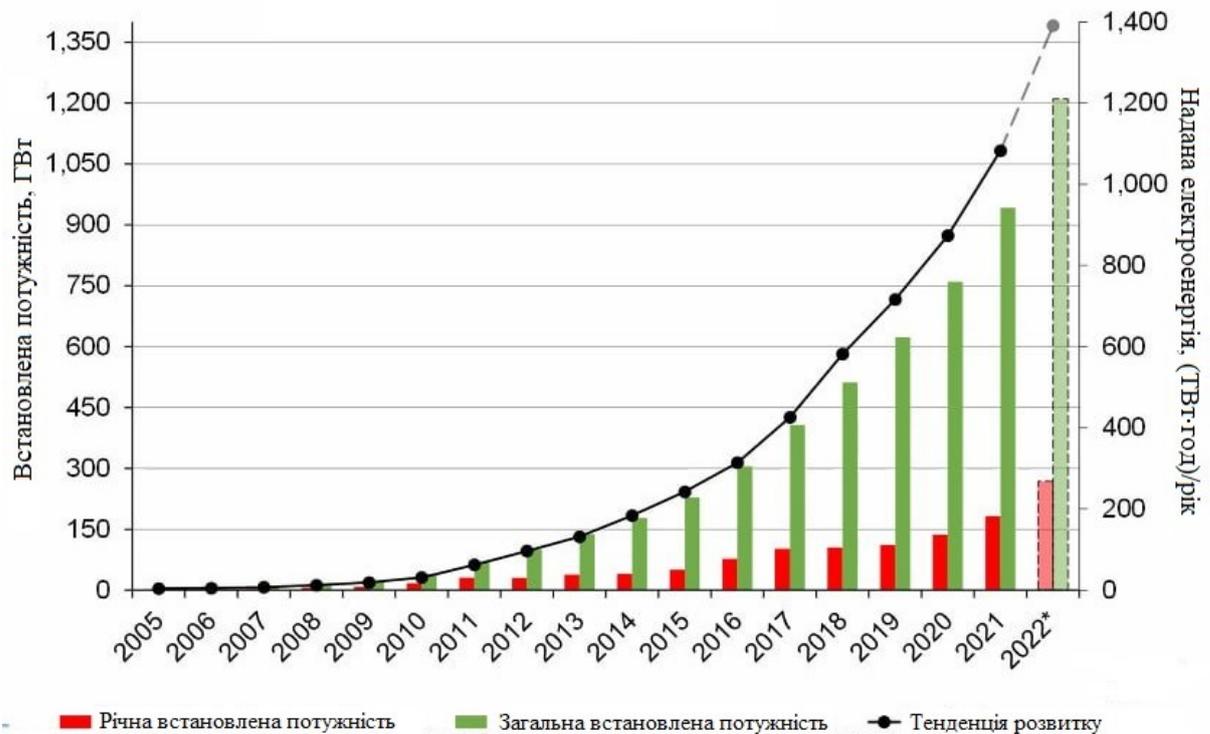


Рисунок 1.1 – Світові тенденції нарощування потужностей фотоелектричних панелей та обсяги отриманої енергії

Разом з тим постійні наукові дослідження, які проводяться в даній галузі спонукають до появи нових технологій та покращення ефективності існуючих типів фотоелектричних панелей. Стрімка тенденція до збільшення встановленої потужності головним чином пов'язана зі зниженням питомої вартості 1 кВт потужності фотоелектричних панелей, дана тенденція стає можливою за рахунок постійного підвищення ефективності, що є пріоритетною задачею для багатьох науковців світу. Тенденція зміни питомої вартості згенерованої електричної енергії від сонячних фотоелектричних панелей у перерахунку на євро представлено на рисунку 1.2.

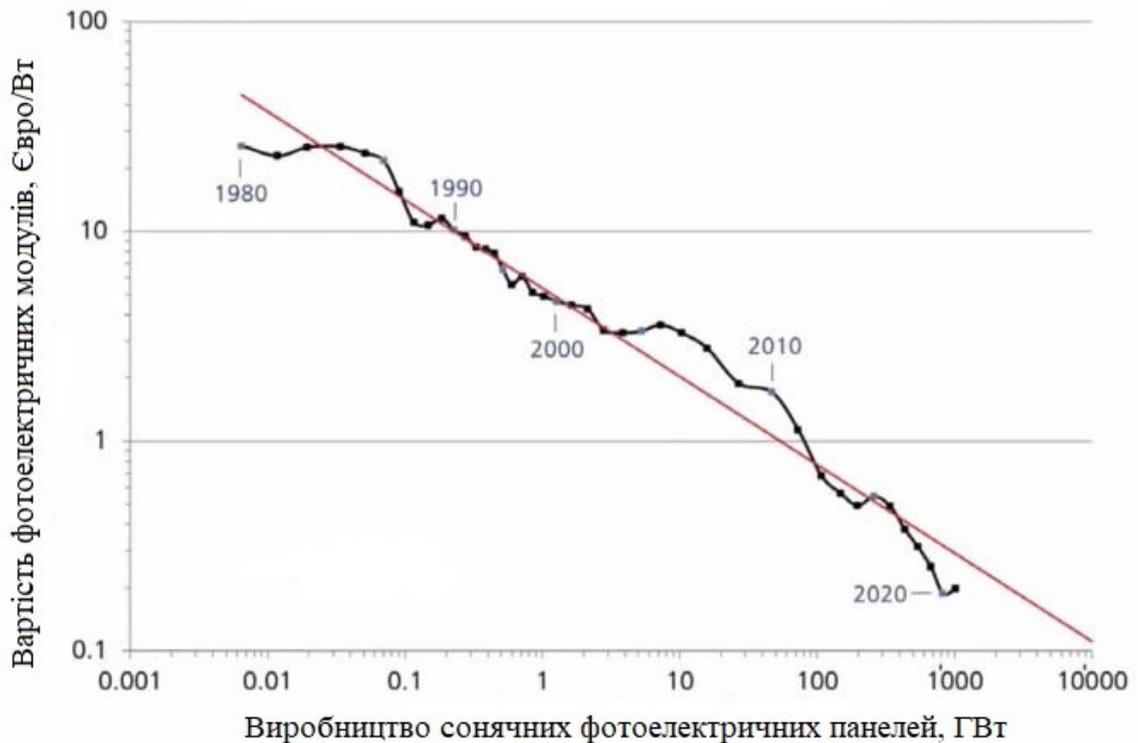


Рисунок 1.2 – Тенденція зміни вартості одиниці потужності фотоелектричних панелей

Принцип роботи фотоелектричних елементів базується на використанні фотогальванічного ефекту, тобто виникнення різності потенціалів при поглинанні світла активним середовищем, що розташовується між двома електродами. Активне середовище представляє собою бінарний матеріал *p-n* типу, в такому матеріалі утворення екситонів під дією сонячного світла супроводжується розділенням електронів та дірок [5].

Завдяки розвитку науки зараз існують різні різновиди фотоелектричних елементів, серед яких можна виділити:

- Монокристалічні;
- Полікристалічні;
- Плівкові;
- Аморфні;
- Органічні;
- Перовскитові;
- Багатоперехідні [6].

Загальна тенденція розвитку даних технологій та їх ефективності представлена на рисунку 1.3

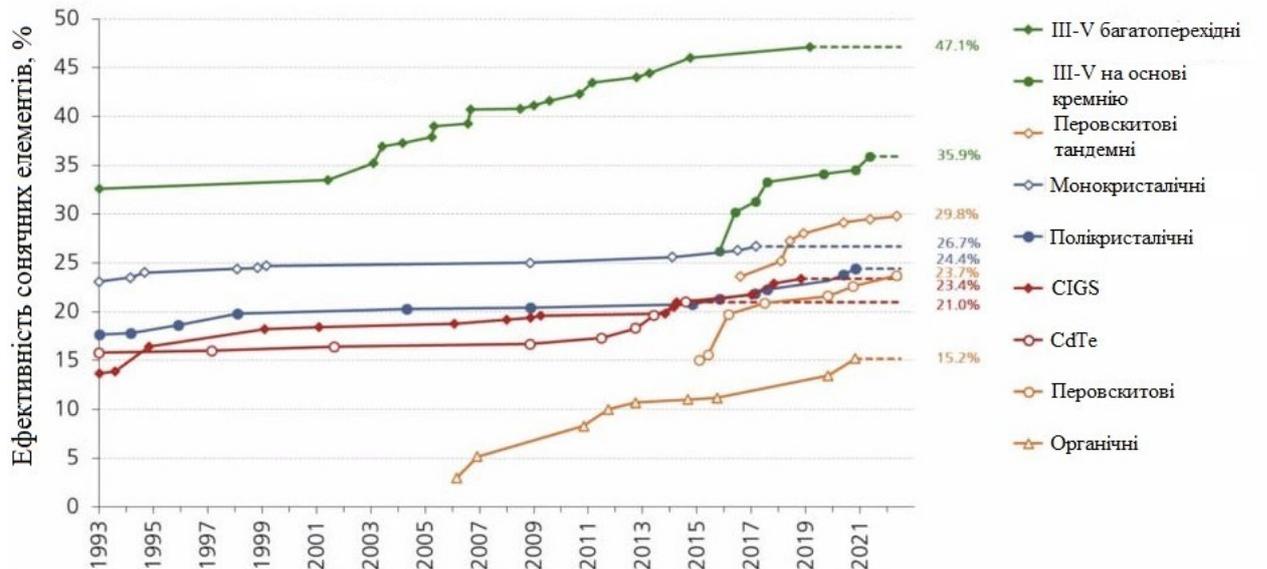


Рисунок 1.3 – Тенденції розвитку ефективності різних типів фотоелектричних панелей

Найбільш ефективним варіантом, який майже в два рази ефективніший за всі інші є багато перехідні фотоелектричні системи, однак їх поширення значно обмежено великою вартістю таких елементів, і на даному етапі ведуться активні наукові дослідження, щодо зниження витрат на матеріали. Приблизно така сама ситуація складається і з багато перехідними фотоелектричними системами на базі кремнію, основною проблемою яких є погана випромінююча здатність кремнію за рахунок непрямой забороненої зони, що потребує інтеграції інших матеріалів, що значно ускладнює та здорожчує процес виробництва, на даному етапі науковцями ведуться активні дослідження щодо розроблення більш дешевих та ефективних варіантів інтеграції інших матеріалів.

Кристалічний кремній на разі є класичним та найбільш поширеним варіантом фотоелектричних панелей, він забезпечує підвищену ефективність по відношенню з аморфним кремнієм та з технологіями перовскитових та органічних фотоелектричних систем [7]. Використання кремнію має ряд

суттєвих переваг, таких як: достатня кількість матеріалів на Землі, відносно низький рівень забруднення, висока довговічність використання матеріалу, великий досвід використання кремнію в галуз мікроелектроніки. Найбільш розповсюдженими на виробництві є кремнієві монокристалічні та полікристалічні елементи [8].

Що стосується перовскитових та органічних сонячних структур то вони є перспективними технологіями, які дозволяють значно зменшити питому вартість виробництва фотоелектричних елементів, однак для перовскитових основним недоліком є низька надійність даних структур. Перовскитові елементи схильні до руйнування під дією вологи та ультрафіолетового випромінювання, тому основні дослідження направлені на підвищення їх надійності та довговічності.

Органічні сонячні структури виготовляються з вуглецю та пластику, що прогнозує також суттєве здешевлення виробництва, однак органічні матеріали мають слабо зв'язані молекули, які можуть уловлювати електрони і сповільнювати виробництва електричної енергії, тому досягнення досить високої ефективності досягається за рахунок створення тандемних структур, що об'єднують різні шари матеріалів, які дозволяють поглинати випромінювання в різних спектральних діапазонах, що дозволяє збільшити ефективність, проте створення тандемних структур є складним та поки що затратним процесом, який не дозволяє конкурувати з кремнієм.

### **1.1.1 Монокристалічні фотоелектричні панелі**

Монокристалічний структурований кремній використовувався в перших варіантах комерційних сонячних панелей, такий тип кремнію отримується шляхом зрощування кристалів з розплавів. В промисловості використовуються три методи зрощування кристалів з розплавів, а саме:

- Метод нормально напрямленої кристалізації;
- Метод витягування кристала з розплавів;
- Метод зонової плавки або зонової перекристалізації.

Найбільше розповсюдження в сонячних панелях перших зразків набув метод витягування кристалів. Цей метод знаходить широке застосування в фотоелектричній промисловості і сьогодні. Сутність цього методу полягає в тому, що спочатку за допомогою різних термічних і хімічних реакції над оксидами кремнію в дугових печах, отримуються кристали чистого кремнію у вигляді порошку або полікристалів, ці компоненти і складають вихідні матеріали для подальшого вирощування кристалів. Вихідні матеріали завантажуються в тигель і нагріваються до розплавленого стану. Після чого затворний кристал розміром в декілька мм, встановлюється в кристалотримач з охолодженням та орієнтується у потрібному напрямку, після чого затворний кристал завантажується в розплав. Процес починається з часткового оплавлення кінця затворного кристалу, і досягнення необхідного температурного режиму, при досягненні усіх необхідних параметрів починається витягування кристала. Витягування проводять таким чином, щоб кристалізація розплаву проходила від затворного кристалу. Діаметр кристала, що витягується регулюється підбором швидкості витягування і температурою розплавлення. У момент контакту затворного кристалу з розплавом можливий термоудар і утворення дефектної області, що містить велику кількість дислокацій. Тому розмір затворного кристалу повинен бути не великим, також для мінімізації отримання дефектної області затворний кристал перед витягуванням розігрівають. Після часткового оплавлення межі розподілу рідкої і твердої фази розташовуються над поверхнею розплаву. Висота розташування межі розділу фази залежить від ступеня перегріву і умов тепловідводу. При сильному перегріві розплаву відбувається розрив стовпа при витягуванні. При занадто низькій температурі навколо кристалу утворюється область переохолодження. У результаті цього відбудеться нарощування кристалів кристалів навіть без витягування.

Після отримання правильних кристалів отриманий стовп кремнію, ділять на фрагменти, ділення відбувається у два етапи, спочатку стовп

кремнію розрізають на прямокутники, а потім вже на слайси, які і утворюють комірки сонячних панелей [9] (Рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Монокристалічні кремнієві слайси

Такі слайси зазвичай виробляються товщиною близько 0,5 мм, мають темно-синій колір та приблизну масу менше 10 гр.

Такий вид сонячних фотоелектричних панелей є найдорожчим, через високу вартість, використання якісної сировини та складність процесу зрощення кристалів. Однак ефективність використання монокристалічних панелей є найвищою (ККД складає до 25%), а також даний тип відрізняється тривалою експлуатацією. Високий показник ефективності досягається за рахунок використання усієї поверхні модуля та захоплення розсіяного сонячного світла [6].

Не зважаючи на високу вартість монокристалічних конструкцій вони є швидко окупають себе. Крім того через високу продуктивність, їх можна встановлювати меншу кількість для забезпечення тієї ж потужності, тим самим економлячи площу на якій вони розташовуються.

Сама сонячна панель, як закінчений функціональний виріб складається з алюмінієвої рами, що використовується в якості каркасу, загартованого скла, двох шарів герметиків типу (EVA), що розташовуються по обидві сторони кремнієвих елементів та задньої кришки, що виконується з листового полімерного матеріалу. Пошаровий склад сонячної фотоелектричної панелі наведено на рисунку 1.4.

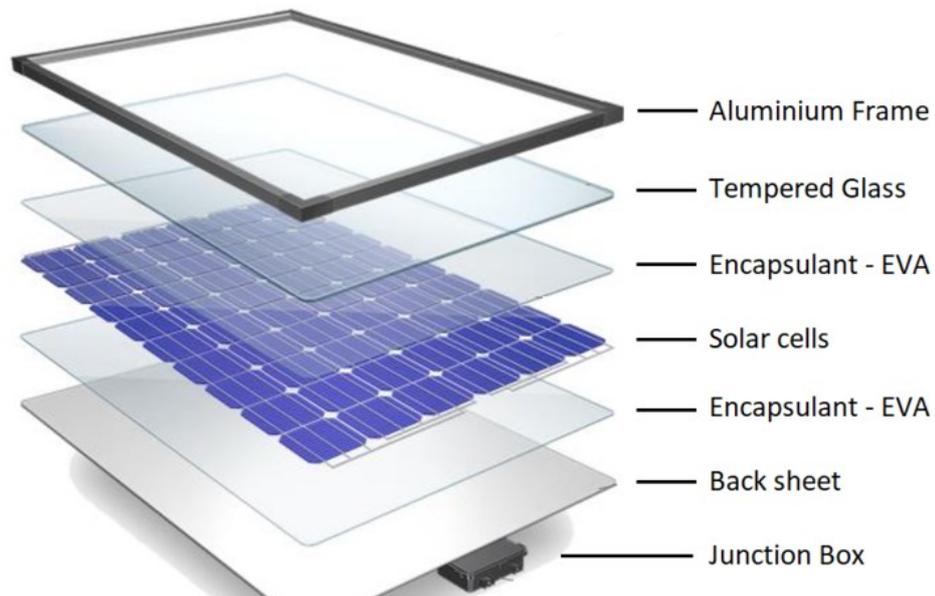


Рисунок 1.4 – Конструкція сонячної панелі

### 1.1.2 Полікристалічні фотоелектричні панелі

Технологія виготовлення полікристалічних елементів сонячних панелей в основному базується на відливанні кремнію. Для цього попередньо заготовлюють вихідний матеріал, склад та структура вихідного матеріалу ідентичні тому, що використовуються при виготовленні полікристалічних елементів, вимоги щодо хімічної чистоти складу також є аналогічними.

Сам процес полягає в тому, що вихідний матеріал розплавляється в печах, а після цього відливається у спеціальні відливки квадратної форми. У цих же формах і відбувається процес повного охолодження відливки [10]. Отримані блоки аналогічним шляхом розрізають на слайси для сонячних панелей (Рисунок 1.5).

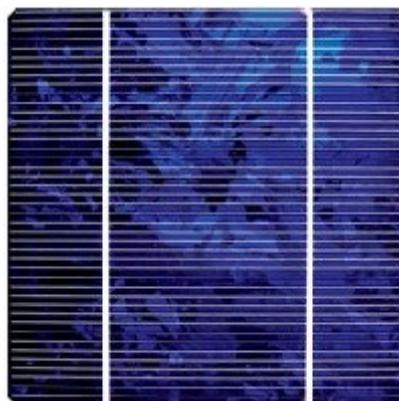


Рисунок 1.5 – Полікристалічні кремнієві елементи сонячних панелей

Такий метод отримання кремнієвих елементів є набагато простішим та більш раціональнішим, на виготовлення одного блоку витрачається значно менше енергії, оскільки при розплаві матеріал одразу розливається, і не потребує підтримання кремнію у рідкій фазі впродовж усього процесу, і по друге при такому методі відбувається максимальне використання матеріалу, оскільки заготовка отримується одразу необхідної форми, у випадку з монокристалом частина отриманих кристалів обрізається для отримання необхідної форми і відправляється на повторне використання.

За своїми якісними показниками полікристалічні елементи поступаються монокристалічним. В основному це пов'язано із набагато простішим процесом виробництва та в окремих випадках меншою чистотою хімічного складу, оскільки такий метод дозволяє використовувати вихідний матеріал будь-якої чистоти, і в бюджетних варіантах сонячних панелей, що представлені на ринку, переважно використовуються відходи від виробництва монокристалічних панелей або кремній, що має недостатній ступінь чистоти.

ККД таких панелей не перевищує 18 %, однак вони є більш популярними в порівнянні з монокристалічними, оскільки менш вибагливі до захоплення сонячного світла та спроможні ефективно працювати в похмуру погоду [6].

Склад конструктивно завершеної фотоелектричної панелі з полікристалічними елементами аналогічний тій конструкції, що наведена на рисунку 1.4.

### 1.1.3 Плівкові фотоелектричні панелі

Плівкові фотоелектричні елементи є процесом розвитку сонячної фотовольтаїки направленої на зменшення вартості самих елементів та бажанням максимальної оптимізації розташування сонячних панелей, яка б сприяла підвищенню енергоефективності.

Тонкоплівкові сонячні елементи виробляються переважно із телуриду кадмію ( $CdTe$ ) або  $GIGS$  [6, 11]. Телурид кадмію ( $CdTe$ ) – напівпровідник з оптимальною для сонячного елемента шириною забороненої зони 1,47–1,48 eВ при кімнатній температурі. Як і  $a-Si$ ,  $CuInSe_2$  і  $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ ,  $CdTe$  –

прямозонний напівпровідник, тому товщини шару всього кілька мікрон достатньо для практично повного поглинання фотонів з енергією  $h\nu > E_g$ . При підвищенні температури ефективність сонячного елемента на  $CdTe$  знижується слабше у порівнянні з кремнієвим, що важливо, враховуючи роботу сонячних модулів за умов потужного опромінення [12].

Плівки  $CdTe$  досить дешеві у виготовленні. Крім того, технологічно нескладно отримувати різноманітні сплави  $CdTe$  з  $Zn$ ,  $Hg$  та іншими елементами для створення шарів із заданими властивостями. Подібно  $CuInSe_2$ , найкращі елементи на основі  $CdTe$  включають гетероперехід з  $CdS$  в якості віконного шару. Оксид олова використовується як прозорий контакт і покриття для пропускання світла.

Серйозною проблемою на шляху застосування  $CdTe$  став високий опір шару  $p-CdTe$ , що призводить до великих втрат електричної енергії всередині самих елементів. Але дана проблема була вирішена за рахунок використання  $p-i-n$  структури з гетеропереходом  $CdTe/ZnTe$  [11].

Використання телуриду кадмію виправдано високим рівнем поглинання ним сонячного світла. Проте вчені тривалий час вели суперечки щодо небезпеки його використання в домашній електроенергетиці через його отруйні випаровування. Але, як свідчать останні дослідження, користування сонячними панелями на основі  $CdTe$  не становлять загрози для людського здоров'я, оскільки всі випаровування, отримані за рахунок активації  $CdTe$  сонячною радіацією, відводяться у атмосферу, тим самим не загрожуючи здоров'ю людини. Ефективність роботи сонячних батарей на основі кадмію дуже мала та складає лише 10%. Тому через їх високу вартість, використання шкідливих матеріалів і низький рівень ефективності вони не користуються широким попитом, хоча є перспективним напрямком розвитку.

Також перспективним матеріалом в розвитку плівкових фотоелектричних елементів є диселенід міді-індію  $CuInSe_2$ . Диселенід міді та індію увійшов у коло найбільш перспективних фотовольтаїчних матеріалів завдяки оптимальному поєднанню своїх оптичних та електричних властивостей [13,

14]. Технологічний процес дозволив підняти коефіцієнт корисної дії тонкоплівкових сонячних елементів з  $CuInSe_2$  до 18% [13, 14]. Однак поведінка точкових дефектів решітки в цій речовині досі залишається до кінця не з'ясованою і очевидно, що знахідки в цьому напрямку можуть розкрити нові шляхи підйому ККД структур на основі  $CuInSe_2$  [15].

Поглинаюча здатність диселеніду міді-індію є дуже високою, так у першому мікроні матеріалу поглинається до 99% світла, а ширина забороненої зони складає 1,0 еВ.

#### 1.1.4 Аморфні сонячні панелі

В більшості випадків аморфні сонячні панелі є різновидом тонкоплівкових сонячних панелей. Сонячні батареї з аморфного кремнію можуть виготовлятися як на гнучкій так і на жорсткій підкладці (наприклад скляна пластина). Перевагою аморфних сонячних панелей на основі аморфного кремнію є те що для роботи таких типів сонячних панелей не потрібне опромінення від сонця прямими потоками світла для нормальний роботи таких панелей достатньо розсіяного світла, яке може опромінювати панелі у похмуру погоду. В результаті такого опромінення сонячні панелі даного типу показують генерацію на 10-15% відсотків більшу ніж традиційні батареї на основі кремнію в похмуру погоду.

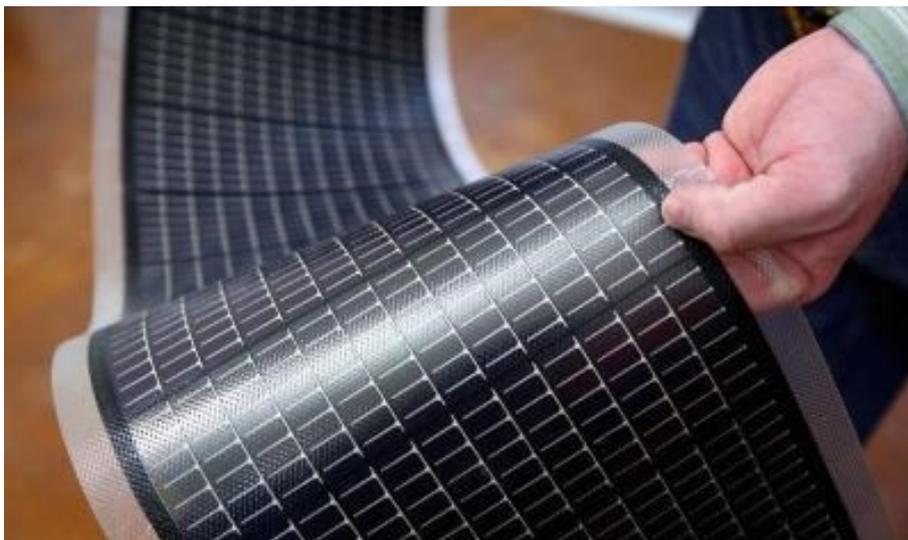


Рисунок 1.6 – Гнучка сонячна панель на основі аморфного кремнію

В якості підкладки для таким сонячних панелей можуть слугувати різні матеріали в залежності від призначення. Основними матеріалами, що використовуються є:

- Різні види металів, найпоширеніший нержавіюча сталь;
- Полімерні плівки різних хімічних складів та форм;
- Спеціальні марки кераміки та фарфору;
- Скла з високим ступенем чистоти хімічного складу;
- Штучних кристалі, типу сапфір та інші.

Технологія виготовлення сонячної панелі на основі аморфного кремнію полягає в тому, що у герметичній камері розташовуються матеріал підкладки та силан, який є основною сировиною для виготовлення сонячних панелей даного типу. Силан або ще одна назва кремневодень має хімічну формулу  $SiH_4$ , для його отримання кремній обробляють воднем щоб отримати хімічні з'єднання типу  $a-Si:H$  або гідрогенізований кремній. В камері силан піддають дії тліючого електричного розряду, в результаті чого отримуються пари кремнію, які осідають на підкладці. Товщина шару, що отримується в результаті осаду парів кремнію становить близько 1 мкм, в той самий час як температура осадження становить приблизно 250-400°C, що є достатньо невеликою в порівнянні з температурою плавлення більшості полімерних та синтетичних матеріалів, що дозволяє використовувати в якості шару підкладки більш дешеві та прості матеріали.

За рахунок використання технології осадження кремнію, можливо виконувати сонячні панелі значних площин одразу, оскільки розміри сонячного елемента не обмежені розмірами кристалів кремнію.

Гідрогенізація кремнію дозволяє отримувати властивості напівпровідників у плівок з товщиною до 1 мкм, що в позитивно впливає на оптичне поглинання матеріалу по відношенню до традиційних кремнієвих сонячних елементів, показник збільшується в 15-20 разів.

## 1.2 Робота фотоелектричних панелей

Найбільший вплив на ефективність роботи сонячних фотоелектричних панелей створює інтенсивність сонячної радіації на земній поверхні. Інтенсивність сонячного випромінювання розподілена по території земної кулі вкрай не рівномірно, тому для кожного окремого регіону задача з визначення ефективності роботи фотоелектричної панелі розглядається поряд з задачами прогнозування надходження сонячної радіації. Кількість сонячної радіації, що досягає поверхні Землі, залежить від різних атмосферних явищ і від положення Сонця як протягом дня, так і протягом року. Хмари – основне атмосферне явище, що визначає кількість сонячної радіації, що досягає Землі. У будь-якій точці Землі сонячна радіація, що досягає поверхні Землі, зменшується зі збільшенням хмарності. Отже, країни з переважною хмарною погодою отримують менше сонячної радіації, ніж у пустелі, де погода переважно безхмарна.

Кількість енергії, що генерується СФП, безпосередньо залежить від кількості одержаних сонячних променів. У безхмарний день під прямими сонячними променями СФП отримують максимум світла, саме в ці години і виробляють максимальну кількість енергії. Коли сонце закривається хмарами, рівень світла знижується. Але це не перериває генерацію енергії. Якщо, попри хмарність, світла все ж таки достатньо, щоб предмети на землі відкидали тінь, сонячні панелі працюватимуть приблизно у половину своєї потужності. Більш щільна хмарність значно зменшить ефективність. У похмурий день сФП панелі будуть виробляти мінімум корисної енергії[8].

Але іноді, у похмурий день, можливий зворотній ефект, якщо сонце опиниться в просвіті між хмарами, СФП будуть отримувати прямі сонячні промені плюс відбите світло хмар, то це призведе до короткотривалого збільшення генерації електроенергії.

Сумарний сонячний потенціал нашої планети наведено на рисунку 1.7.

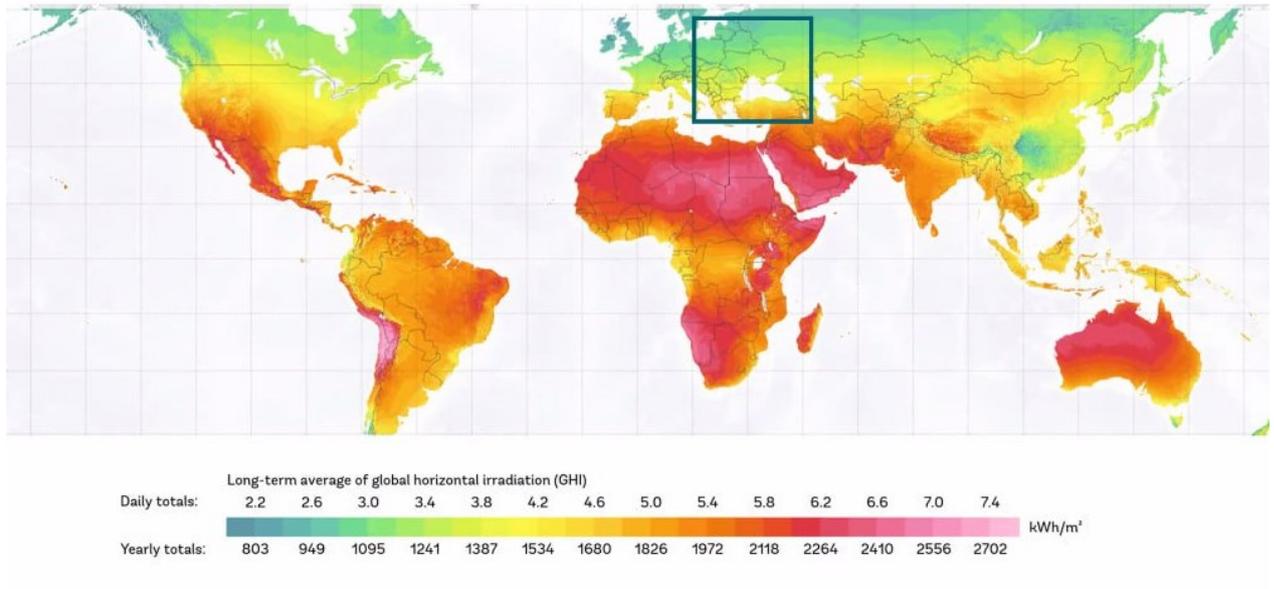


Рисунок 1.7 – Сумарний сонячний потенціал Землі

Як можна побачити з рисунку сукупний потенціал України в порівнянні з багатьма іншими країнами є посередній. Такий рівень потенціалу насамперед обумовлений сезонними змінами клімату, що особливо в зимовий період стрімко зменшує інтенсивність сонячної радіації, а за рахунок високої хмарності більшість випромінювання досягає земної поверхні у вигляді дифузної радіації, що також певним чином буде впливати на роботу фотоелектричних панелей. Проте географічне розташування України дозволяє з достатньою ефективністю використовувати існуючі типи СФП, та реалізовувати інвестиційні проекти в даному галузі.

Однак при більш детальному розгляді можна побачити, що навіть в межах кордонів України інтенсивність сонячної радіації розподілена нерівномірно і суттєво відрізняється при наближенні до південних регіонів країни.

Розподіл річних сум сонячної радіації в межах України наведено на рисунку 1.8.

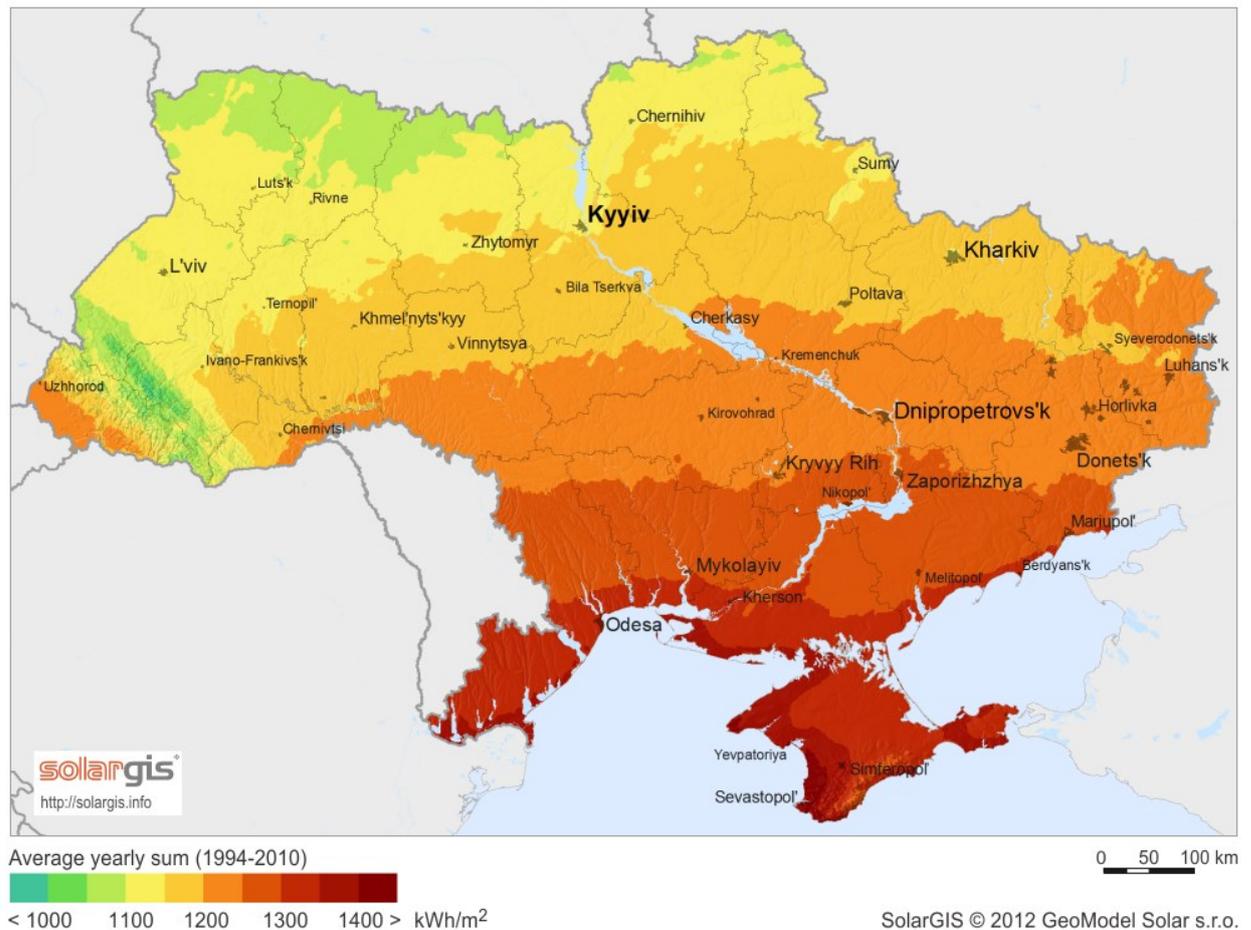


Рисунок 1.8 – Сумарний сонячний потенціал України

Найбільш перспективними регіонами для сонячної енергетики є південні регіони, і особливо узбережжя Чорного та Азовського морів, в той час як потенціал північних регіонів менший приблизно на 400 Вт/м<sup>2</sup>, тому робота сонячних фотоелектричних панелей та їх ефективність безпосередньо залежить від сонячного потенціалу регіону в якому вони встановлюються.

Окрім сонячної радіації існує ще ряд факторів, які суттєво можуть впливати на ефективність роботи фотоелектричних панелей.

Температура впливає на ефективність фотоелектричного елемента через власну характеристику напівпровідникового матеріалу. Зі збільшенням температури, потік електронів в середині елементів наростає, відповідно до цього і збільшується струм викликаючи падіння напруги. Падіння напруги в

цьому випадку більше ніж збільшення сили струму, що призводить відповідно до зменшення генерованої потужності.

Втрати потужності в сонячних панелях визначаються «температурним коефіцієнтом», процентом зниження ефективності з прив'язкою до градусів Цельсія. Він визначає наскільки знижується ефективність при підвищенні температури оточуючого середовища на кожен градус. Це значення визначається заводами виробниками практично при температурі 25 °С та унікальне для кожного типу панелей. Для кремнієвих, як полі- так і монокристалічних панелей значення температурного коефіцієнта коливається в межах від 0,45% до 0,50%. Таким чином при підвищенні температури панелі на 20 °С, втрати потужності складають близько 10 %[7].

У полярних широтах ефективність перетворення більша, ніж на екваторі, завдяки низькій температурі, але через меншу інтенсивність сонячної радіації загальна продуктивність значно менша. [5].

Для вирішення питання перегріву сонячних панелей, і як наслідок збільшення їх ефективності розроблені комбіновані конструкції з повітряним та водяним відведенням теплової енергії з панелей.

Кліматичні умови та географічне розташування сонячних панелей відіграють важливу роль у виборі правильного кута нахилу для ефективного перетворення енергії.

Сонячна радіація на поверхні, перпендикулярній до напрямку поширення сонячної радіації, завжди більша, ніж якщо розмістити ту саму поверхню в будь-якому іншому положенні. Нахил враховує положення сонця протягом року, через це його оптимальне положення може змінюватися з часом. Тому для встановлення стаціонарних модулів зазвичай вибирають значення нахилу для максимальної середньої потужності, отриманої за рік.

Для максимально ефективного перетворення сонячної енергії в електричну, СФП повинні бути встановлені під кутом, орієнтованим безпосередньо на сонце, проте оскільки кут положення сонця змінюється протягом доби та впродовж року, для утримання такої орієнтації необхідні

спеціальні слідкуючі системи. Однак дані слідкуючі системи значно здорожують реалізацію проектів сонячної енергетики, тому більшого поширення знайшли статичні системи кріплення. Як правило такі системи не змінюють свій кут нахилу ні протягом дня ні протягом року, однак при проектуванні системи кріплення враховується націленість СЕС на конкретний сезон, так для літніх місяців найбільш ефективними є менші кути нахилу СФП в межах  $15-20^\circ$ , для зимніх навпаки більші  $50-55^\circ$ , для всесезонної роботи як правило обирають або середні кути між наведеними діапазонами або орієнтуються на літні місяці оскільки при таких кутах сумарний річний ефект буде більшим.

Окрім кута нахилу одними із базових кутів, що впливає на ефективність роботи СФП є її орієнтація. Орієнтація СФП – це кут відхилення від географічного півдня поверхні або від півночі в південній півкулі. Максимально допустимі відхилення  $\pm 20^\circ$ . Розташування СФП з таким діапазоном відхилення від півдня є доцільним з точки зору ефективності, щоб СФП отримувала достатню кількість прямого сонячного випромінювання, зі збільшенням кута відхилення від півдня, обсяги прямого випромінювання зменшуються, а ефективність роботи панелі здебільшого визначається рівнями дифузної радіації. Однак практичний досвід побудови дахових СЕС показує, що їх спорудження виявляється доцільним і при більших кутових відхиленнях, а останні тенденції розвитку проектних рішень навіть зупиняються на варіантах побудови систем «Схід-Захід» та кубічних конструкціях розташування СФП. В системах «Схід-Захід» кожна СФП розташовується відносно півдня під кутом  $\pm 90^\circ$ , проте ефект досягається за рахунок збільшення сумарного часу опромінення СФП, так при сході сонця, більш активно виявляється СФП направлена на схід, в той час як СФП направлена на захід певний час взагалі не генерує ЕЕ, а при досягненні певного рівня дифузної радіації починає також генерувати ЕЕ, після півдня ситуація змінюється. Концепційний графік генерації системи «Схід-Захід» представлений на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 – Порівняння системи орієнтації «Схід-Захід» з СФП орієнтованими чітко на південь

Як можна побачити з рисунку система «Схід-Захід» має провал в генерації ЕЕ в південь, коли інтенсивність є найбільшою, а отже відбувається зменшення ефективності використання сонячних надходжень, і окрім цього СФП які орієнтовані на схід та на захід повинні мати різні інвертори, що додатково збільшує вартість окрім збільшення необхідної площі СФП.

Також СФП дуже чутливі до сонячного затінення. Умови повного або часткового затінення значно впливають на здатність передавати енергію та можуть призвести до зниження вихідної потужності та втрат. Елементи СФП зазвичай з'єднуються послідовно, щоб отримати більш високу напругу, але коли відбувається затінення, ця структура представляє деякі обмеження.

Залежно від об'єктів, які створюють тінь, існують різні типи затінення:

- Тимчасове затінення – включає затінення, яке є результатом хмар, пташиного посліду, пилу або опалого листя;
- Затінення від будівлі – є критичним, оскільки передбачає прямі тіні протягом тривалого часу або на постійній основі. Прикладами цього типу затінення є димові труби, освітлювальні провідники, супутникові антени, антени, виступи даху та фасаду, зміщена будівельна конструкція, надбудова даху.

– Самозатінення – виникає від неправильного монтажу СФП, коли при зміні кута сонця над обрієм ряди СФП починають відкидати тінь, яка за довжиною є більша за відстань між рядами, в таких випадках нижні комірки СФП потрапляють в тіньові зони.;

Коли окрема сонячна комірка затінена, струм усіх одиниць послідовно з'єднаних у рядку визначається одиницею, яка виробляє найменший струм, тобто коли комірка панелі затінена, усі інші також віртуально затінені. Для запобігання втрат енергії в схему з'єднання комірок зазвичай входять обхідні діоди, які називають байпасними. Байпасні діоди підключаються паралельно до сонячних комірок, щоб забезпечити альтернативний електричний шлях для протікання сформованого струму, оскільки він не може протікати через комірку при затіненні. Це допомагає зберегти продуктивність послідовного струму, обмежуючи зворотну напругу зміщення, що генерується на будь-якій частково затіненій комірці, і, отже, зменшує електричну потужність, яку може розсіювати комірка.

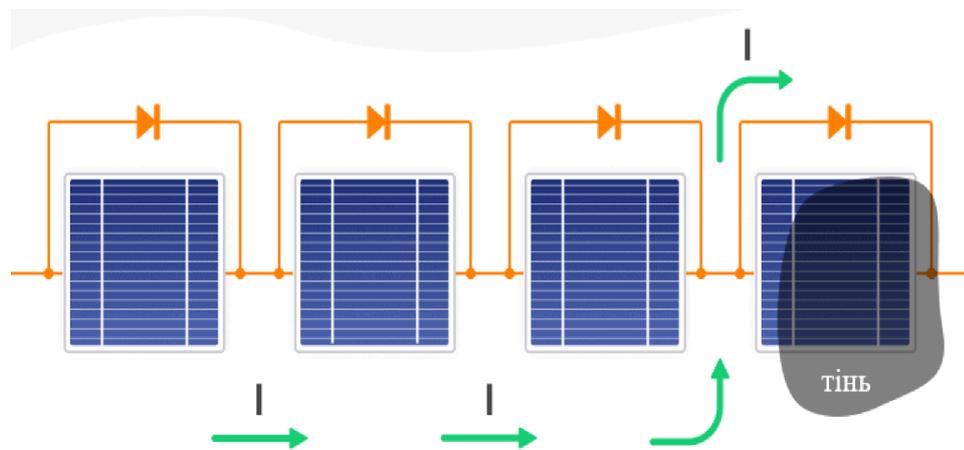


Рисунок 1.10 – Використання байпасних діодів

### 1.3 Підвищення ефективності фотоелектричних панелей за рахунок комбінованого виробництва енергії

Найбільш ефективно сонячні фотоелектричні панелі працюють в ясну погоду, яка для наших широт характерна лише влітку, а взимку зі зменшенням кількості та тривалості сонячного випромінювання генерація суттєво

зменшується. Однак сонячне світло несе з собою ще і тепло, яке негативно впливає на показники генерації.

Доказано, що при генерації електричної енергії сонячне випромінювання із довжиною хвилі від 600 до 700 нм поглинається фотоелементами і перетворюється на електричну енергію, а випромінювання, що залишилося, перетворюється на теплову енергію та викликає нагрів сонячної панелі [17]. Зі збільшенням температури потік електронів в середині елементів наростає, відповідно до цього і збільшується струм, викликаючи падіння напруги. Падіння напруги в цьому випадку більше ніж збільшення сили струму, що призводить відповідно до зменшення генерованої потужності.

Дану проблему науковці світу намагаються вирішити за рахунок створення гібридного колектора. Гібридний сонячний колектор *PV/T* – це сукупність пристроїв або конструктивних елементів одного пристрою, що дозволяють чинити одночасні процеси отримання теплової та електричної енергії. В гібридних сонячних колекторах, окрім додаткового отримання теплової енергії, що в перерахунку на питому енергію з площі вже підвищує ККД, ще забезпечується постійність теплового режиму фотоелектричної частини, що зменшує втрати в самій панелі пов'язані із нагріванням.

Питання гібридних колекторів є актуальним по всьому світу та відноситься до варіантів підвищення ККД сонячних панелей без зміни хімічного складу напівпровідників, і виконується зазвичай на традиційних сонячних кремнієвих панелях моно- або полікристалічної структури. Перші експериментальні дослідження фотоелектричної термальній (*PV/T*) системи датуються Керном та Расселом у 1978 році [16], які вперше представили концепцію *PV/T* колектора. Вода чи повітря використовувалися як рідина для видалення поглиненої енергії. Рагураман розробив дві різні одновимірні моделі для прогнозування теплових і електричних характеристик плоских пластинчастих *PV/T* колекторів як рідинних, так і повітряних. Гарг та Адхікарі проаналізували систему повітряного охолодження *PV/T* з одинарними та

подвійними скляними кришками [18]. У 2000 році Сопіаном була розроблена математична модель, що базується на принципі балансу енергії. Модель була випробувана на двоходовому фотоелектричному тепловому сонячному колекторі. Отримані результати показали гарну узгодженість експериментальних та теоретичних результатів [19]. У 2003 році Чоу та інші досліджували варіанти використання *PV/T* на будівлі готелю у Південному Китаї. *PV/T* колектори були прикріплені до службового приміщення з кондиціонуванням повітря протягом усього дня, щоб дослідити його охолодження за допомогою природного потоку повітря. В результаті дослідження було визначено вплив кліматичних умов на режим роботи системи, що в свою чергу суттєво впливає на продуктивність фотоелектричних модулів [20]. Осман та інші у 2005 році теоретично та експериментально досліджував сонячний повітряний колектор *PV/T* з концентруючими відбивачами [21]. Шахсавар та інші у 2010 спроектував, побудував та випробував колектор *PV/T* зі скляною кришкою і без неї в Кермані, Іран, в умовах природної та примусової конвекції з використанням двох, чотирьох та восьми вентиляторів [22].

З урахуванням усіх вище перерахованих досліджень дослідники з Іраку, розробили математичну модель, яка враховувала додатково ефект раціонального теплообміну в повітропроводі. Також в даній моделі було розглянуто конвективний перенос теплоти від ізоляційного матеріалу до теплоносія.

Таким чином розвиток науки в цій галузі сформував два основні напрямки розвитку гібридних *PV/T* колекторів, а саме: рідинні та газові. В свою чергу рідинні гібридні колектори використовують в якості охолоджуючого середовища будь-які рідини з теплофізичними властивостями, що задовольняють вимоги, а газові відповідно використовують різні гази та суміші газів.

Однак специфіка використання та дослідження гібридних *PV/T* колекторів показала, що отримане тепло від сонячних гібридних колекторів

має відносну невелику температуру, тому при використанні в якості охолоджуючого середовища поверхні нагрівання рідин або газів з покращеними теплофізичними властивостями необхідно будувати системи замкнутого циклу, що в свою чергу сприяє встановленню теплообмінного апарату, який переносить тепло від рідини або газу до робочого тіла, яке б могло безпосередньо використовуватись, а також сприяє неповноті використання отриманого тепла. Тому більше розповсюдження отримали гібридні колектори у яких охолоджуюче середовище і є робочим тілом, тобто використовується вода або повітря, які після нагрівання подається безпосередньо до систем тепловикористання. В даних випадках охолоджуючі рідини або гази подаються в колектор від мережі централізованого водопостачання при використанні в якості охолодження води або із атмосфери при використанні повітря.

Зондтаг вивчав наступні види конструкцій плоских сонячних колекторів, що наведені на рисунку 1.11.

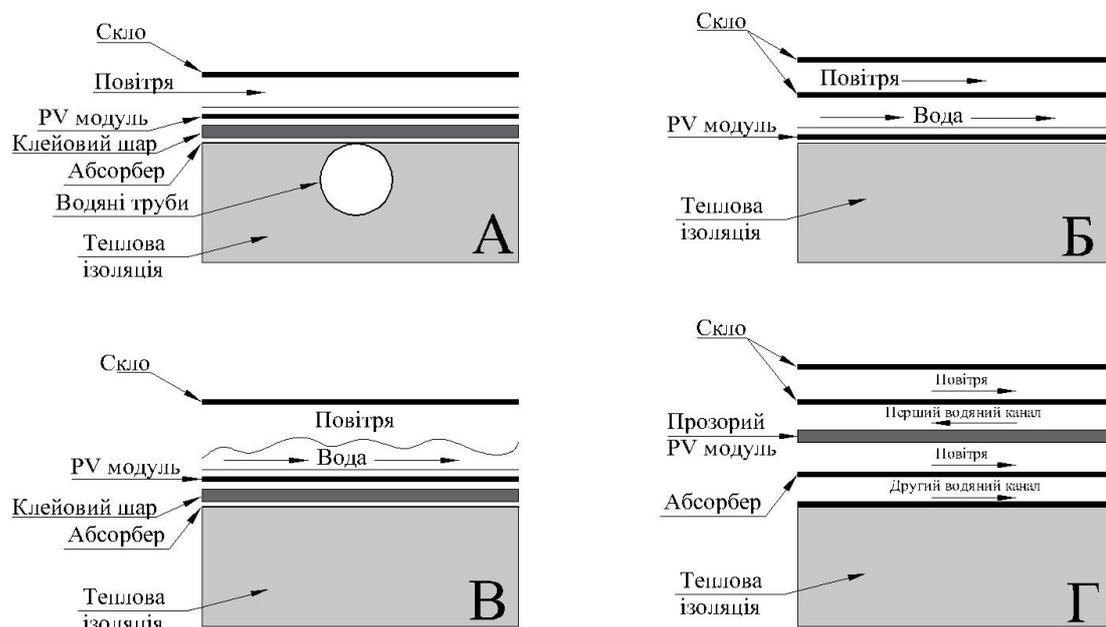


Рисунок 1.11 – Основні конструкції гібридних *PV/T* колекторів

*А) листотрубна, Б) канална, В) з вільним потоком, Г) з подвійним абсорбером*

Основною конструктивною схемою гібридного сонячного колектора з водяним теплоносієм за якою виконуються сучасні гібридні колектори є

листочубна, що представлена на рисунку 1.11-А, яка складається зі звичайного фотоелектричного кремнієвого модуля до якого з нижньої частини приєднується модуль теплового колектора. Зондтагом відмічено, що подібні конструкції можуть мати різні недоліки, такі як наприклад, схема плаского листочубного колектора повинна бути удосконалена з більшою ефективністю, а теплообмін рідин в каналах плаского гібридного колектора потребує ретельного вивчення.

Окрім того зазначено, що при вільному потоці (Рисунок 1.11-В), гібридний сонячний колектор втрачає частину накопиченого тепла за рахунок випаровування. Відповідно до результатів дослідження Зондтага найкраща ефективність досягається при використанні схеми, коли канали теплоносія знаходяться під прозорим фотоелементом, як показано на рисунку 1.11-Г. Також встановлено, що рідинні гібридні *PV/T* колектори, працюють з більш високою ефективністю у порівнянні з повітряним теплоносієм, навіть якщо повітряні гібридні *PV/T* колектори мають більш низькі затрати, то в побутовому секторі їм віддають менше перевагу, через складність використання теплової енергії.

Талавера проводив дослідження в результаті яких перевірялися два типи приєднання гібридних колекторів до мережі, це автономні та мережеві, за результатами досліджень Талавера зміг доказати, що більш вигіднішим варіантом є коли гібридний *PV/T* колектор працює з мережею.

Також для гібридних колекторів проводився порівняльний аналіз в якому порівнювалися гібридні конструкції та окремі сонячні теплові системи. Експериментальні результати допомогли встановити, що найкращу ефективність гібридні колектори показують в умовах міської забудови. Навіть якщо окрема тепла система має більшу теплову конкурентоспроможність, то система гібридних колекторів має кращі характеристики за рахунок одночасної генерації електричної енергії.

Сінгх та його лабораторія у 2016 розробила модель двоканального напівпрозорого гібридного фотоелектричного теплового колектора, де

повітряний потік проходить одночасно по лицьовій та тильній поверхні осередків фотоелементів, тобто. через верхній та нижній повітряні канали. Згідно з результатами, загальна ефективність ексергії та загальна теплова ефективність становила 5,78% та 35,41% відповідно.

Ватс і Тіварі в 2012 році провели оцінку теплової та екзеґетичної ефективності гібридного *PV/T* колектора з осередками кристалічного кремнію (*CSi*) для приміщення об'ємом 21 м<sup>3</sup> і зробили висновок, що ефективно використовується лише 33% теплової енергії. [23].

#### 1.4 Особливості існуючих гібридних колекторів

Не зважаючи на велику кількість різноманіття конструкції, що були представлені науковцями світу, на ринку Україні сектор гібридних *PV/T* колекторів представлений лише однією лінійкою фірми *ATMOSFERA* (Рисунок 1.12). В даній лінійці представлено три види колекторів:

- *ATMOSFERA F2PV*;
- *POWERVOLT W 200/500*;
- *POWER THERM M 180/750*.

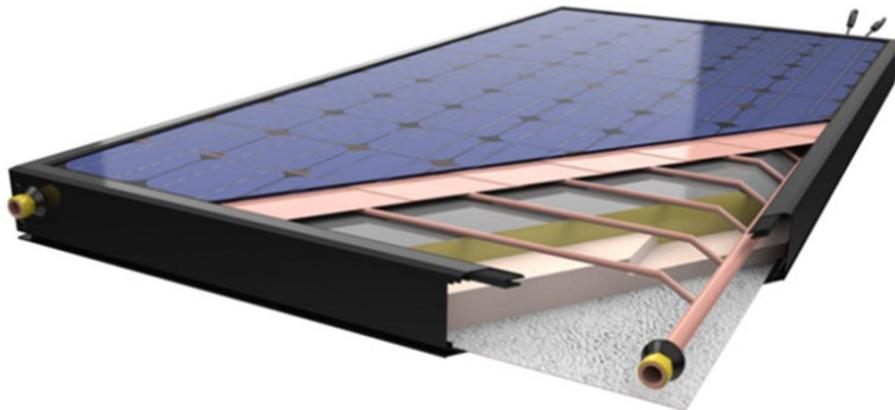


Рисунок 1.12 – Загальний вигляд гібридного сонячного колектора фірми *ATMOSFERA*

В той самий час гібридні колектори *POWERVOLT W 200/500* і *POWER THERM M 180/750* є різновидом однієї і тієї ж конструкції, однак мають відмінності в конструкції теплової частини, через що модель *POWERVOLT* має кращі електричні характеристики, генерація складає 200

Вт, замість 180 Вт колектора типу POWERTHERM, однак в той самий час POWERTHERM має більшу теплову потужність на рівні 750 Вт, замість 500 Вт. Колектор типу ATMOSFERA F2PV є бюджетним варіантом адаптації гібридних колекторів, в ньому використовується замість мідного абсорбера алюмінієвий, а замість монокристалічного сонячного модуля – полікристалічний. Незважаючи на суттєві погіршення в конструкції ATMOSFERA F2PV з однієї сторони, він має набагато більшу потужність. Збільшення потужності в порівнянні з іншими моделями досягається за рахунок збільшення площі, моделі POWERVOLT і POWERTHERM мають повну площу поверхні 1,37 м<sup>2</sup> і 1,42 м<sup>2</sup> відповідно в той час, як ATMOSFERA F2PV має площу 2,02 м<sup>2</sup>. Показники генерації електричної потужності за технічними даними виробника в перерахунку на 1 м<sup>2</sup> площі становить між моделями POWERVOLT і ATMOSFERA F2PV 145,8 Вт і 148,6 Вт, а теплової енергії між моделями POWERTHERM і ATMOSFERA F2PV 528,1 Вт і 557,5 Вт, тобто ефективність другого виду колекторів є більша, хоча такі показники можуть бути навмисно завищеними, оскільки практичних та дослідних даних стосовно ефективності роботи даних колекторів в мережі немає. Порівняльні дані трьох типів гібридних колекторів наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика гібридних колекторів фірми ATMOSFERA

Назва параметру	ATMOSFERA F2PV	POWERVOLT	POWERTHERM
Загальна потужність колектора, Вт	1337	700	930
Електрична потужність, Вт	300	200	180
Теплова потужність, Вт	1037	500	750
Розміри (ШхДхВ), мм	1006x2007x85	828x1655x90	870x1640x105
Тип прозорого покриття	Призматичне скло, 4 мм	Скло з низьким вмістом заліза PV скло, 3,2мм	Посилене скло з низьким вмістом заліза, PV скло 4 мм

Продовження таблиці 1.1

Назва параметру	ATMOSFERA F2PV	POWERVOLT	POWERTHERM
Площа апертури, м <sup>2</sup>	1,86	1,36	1,42
Площа абсорбера, м <sup>2</sup>	1,86	1,3	1,4
Теплообмінник	Алюмінієвий теплообмінник <i>Roll-Bond</i>	Мідна пластина	Мідна пластина
Тип PV	Полікристал	Монокристал	Монокристал
ККД PV, %	-	17,5	11,5
Кількість PV комірок в модулі, шт	72	72	72
Розмір PV комірок, мм	156x156	125x125	125x125
Витрата води, л/год	72	65	65
Номинальний струм, А	8,15	5,43	4,98
Струм короткого замикання, В	8,78	5,67	5,4
Номинальна напруга, В	36,82	36,8	36,16
Напруга короткого замикання, В	45,31	46,3	44,64
Маса, кг	37	24,4	34,4
Робочий тиск, бар	6	10	10
Ціна, Євро	812	600	620

Однак, як видно з порівняльної характеристики гібридних колекторів, їх параметри є посередніми як у відношенні генерації електричної енергії так і у відношенні отримання теплової енергії. Зокрема зазначені типи гібридних колекторів є конструктивно завершеними пристроями, що дозволяє отримувати більше енергії при будівництві нових проектів з використанням сонячної енергії, а сектор існуючих сонячних панелей залишається неохоплений через неможливість перетворення їх у гібридні колектори. Тому необхідно розробляти конструктивні рішення, які б дозволяли використовувати теплову енергії з уже існуючих сонячних панелей.

## Висновки до розділу 1

1. Номенклатура фотоелектричних сонячних панелей є достатньо широкою та постійно модернізується за рахунок бажання покращити експлуатаційні характеристики та підвищити їх ККД.

2. Багато сучасних розробок, що базуються на використанні різних хімічних елементів замість кремнію ставлять за мету зменшення залежності генерації електричної енергії від нагрівання.

3. Ключовим фактором, який дозволяє встановити ефективність конкретної системи є рівень інтенсивності сонячної радіації.

4. Робоча температура СФП значним чином впливає на рівень генерації електричної енергії та при високих значеннях викликає втрати, які обумовлені індивідуальним температурним коефіцієнтом.

5. Перспективним шляхом підвищення ККД сонячного колектора та зменшення втрат від нагрівання сонячної фотоелектричної панелі є гібридний *PV/T* колектор.

6. Найбільш ефективним варіантом гібридного *PV/T* колектора є колектор, що використовується в міській забудові, приєднаний до мережі та має водяний теплоносій.

7. Номенклатура гібридних *PV/T* колекторів, що представлена на ринку є досить обмежена і одноманітна, а відповідно до представлених досліджень науковців світу, ці конструкції що виробляються промисловістю повинні модернізуватися.

## РОЗДІЛ 2

### ВЛИВОВІ ФАКТОРИ ТА МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

На роботу сонячних електростанцій, а саме на їх ефективність, незалежно від типу та конструкцій головним чином впливає інтенсивність сонячного випромінювання. Значною відмінною ознакою сонячного випромінювання у порівнянні з іншими джерелами та системами перетворення енергії є складність контролю кількості енергії, що надходить на поверхню. Даний параметр є змінною у часі величиною та залежить від багатьох зовнішніх факторів, зокрема:

- Відстань від Землі до Сонця, ця величина не є сталою, оскільки орбіта Земної кулі рухається за еліптичною траєкторією;

- Нахил Земної вісі, Земна вісь має нахил по відношенню до орбіти за якою обертається навколо Сонця, що дорівнює  $23,5^\circ$ . Цей нахил разом із добовим обертанням Земної кулі навколо своєї осі впливає на протяжність доби, розподілення Сонячного випромінювання по поверхні Землі, зміну пори року;

- Атмосферне ослаблення, поверхня Землі оточена атмосферою, що має переважно газоподібну структура, однак в даній структурі також наявні різноманітні урівноважені тверді та рідкі частинки, що перебувають в просторі окремо, або сформовані у вигляді хмар, а отже проходження сонячної радіації через атмосферу викликає ослаблення її інтенсивності.

Окрім зазначених глобальних факторів, що впливає на інтенсивність сонячної радіації також значний вплив мають локальні фактори такі як:

- Географічне розташування, в більш сонячних регіонах Землі сонячним перетворювачам доступна більша кількість сонячної радіації, ніж в регіонах з перевагою похмурого клімату. Здебільшого чим менша широта розташування регіону тим більшу кількість сонячного випромінювання може

отримати сонячний перетворювач, за рахунок меншого кута нахилу променів, що падають на поверхню.

- Розташування сонячних перетворювачів, при виникненні будь-яких перешкод для опромінення сонячних перетворювачів променями Сонця, таких як затінення від будівель або споруд, кількість отриманої енергії, буде зменшуватись пропорційно площі та часу затінення. В даному випадку ефективність опромінення буде меншою за опромінення на відкритій місцевості.

- Орієнтація сонячного перетворювача, цей фактор є одним із основних та важливих, що впливає безпосередньо на ефективність роботи. Ідеальними умовами орієнтації сонячного перетворювача є варіант коли промені постійно опромінюють поверхню перетворювача під кутом  $90^\circ$ . Такий варіант в більшості випадків можливий при використанні систем спостереження за рухом Сонця. При використанні суто перетворювачів з незмінним кутом нахилу (стаціонарні перетворювачі) для північної півкулі оптимальним варіантом є південна кутова орієнтація, оскільки вона дозволяє забезпечити максимальне опромінення.

- Пора року, значною мірою впливає на тривалість світлої частини доби, що в свою чергу впливає на протяжність опромінення і як наслідок на кількість сумарної отриманої енергії. Також для наших широт пора року впливає на утворення атмосферних явищ, що негативно впливає на кількість та інтенсивність сонячної радіації, що надходить на поверхню Землі.

- Атмосферні умови, є найбільш важливою та найбільш складною в прогнозування складовою, що значною мірою впливає на кількість сонячного випромінювання. До атмосферних умов можна віднести хмарність, забруднення району частками пилу, водяного пару або будь-яких інших летких речовин, що можуть потрапити до навколишнього середовища. Найбільшу вагу в цьому випадку мають хмари, оскільки можуть зменшувати кількість падаючого випромінювання до 90%.

- Тип сонячного перетворювача, основні характеристики різних типів перетворювачів, були детально розглянуті у 1 розділі.

## 2.1 Базові геометричні величини руху землі

Земля має два основних типи руху: рух Земної кулі навколо Сонця за орбітою та рух Земної кулі навколо власної осі (обертання). Навколо своєї вісі Земна куля виконує один оберт за 24 години, в той час як повний шлях за своєю орбітою відбувається за 365,25 діб. Орбіта Земної кулі за якою утворюється один оберт навколо Сонця має еліптичну форму. Ексцентриситет орбіти незначний і дорівнює  $e=0,01673$ , що відповідає майже формі ідеального кола. Таким чином перигелій та афелій земної орбіти складають

$$R_p = a(1 - e) = 147,1 \cdot 10^6 \text{ км}, \quad (2.1)$$

$$R_a = a(1 + e) = 152,1 \cdot 10^6 \text{ км}, \quad (2.2)$$

де  $a$  – це середня відстань Землі від Сонця, що дорівнює половині суми перигелія та афелія відстані і дорівнює  $149,5985 \cdot 10^6$  км.

Приблизно 3-го січня земна куля знаходиться найближче до Сонця в той час як найбільша відстань від Землі до Сонця спостерігається приблизно 1 липня та знаходиться приблизно на 3,3% далі.

Вісь обертання Земної кулі має нахил який становить  $23,5^\circ$  відносно орбіти обертання планети навколо Сонця. Здійснюючи свій рух орієнтація орбіти не змінюється. Даний нахил вісі обертання разом із добовим обертанням планети та рухом вздовж орбіти значним чином впливає на розподіл сонячної радіації, що надходить на земну поверхню та тривалість як світлої так і темної пори доби.

Положення Землі під в дні сонцестояння наведені на рисунку 2.1, положення Землі в дні сонцестояння та рівнодення наведені на рисунку 2.2

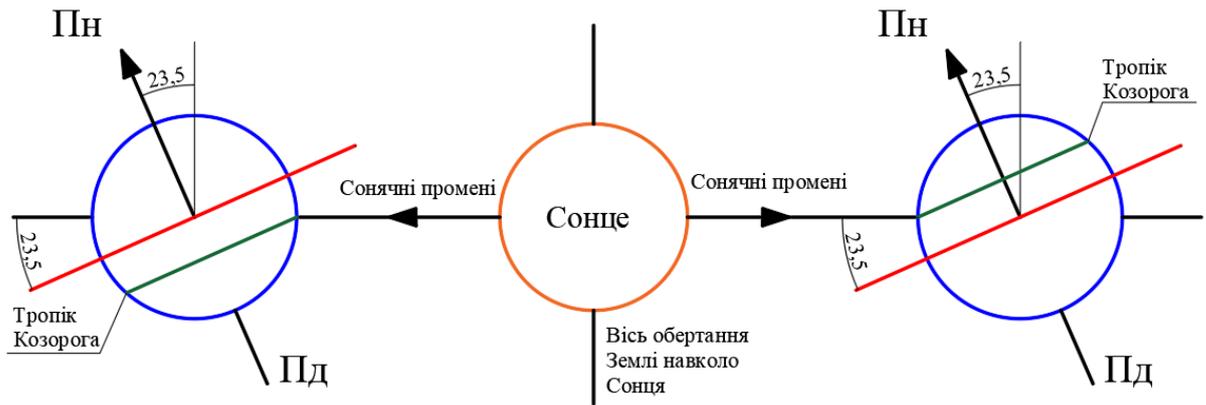


Рисунок 2.1 – Положення Землі в дні сонцестояння

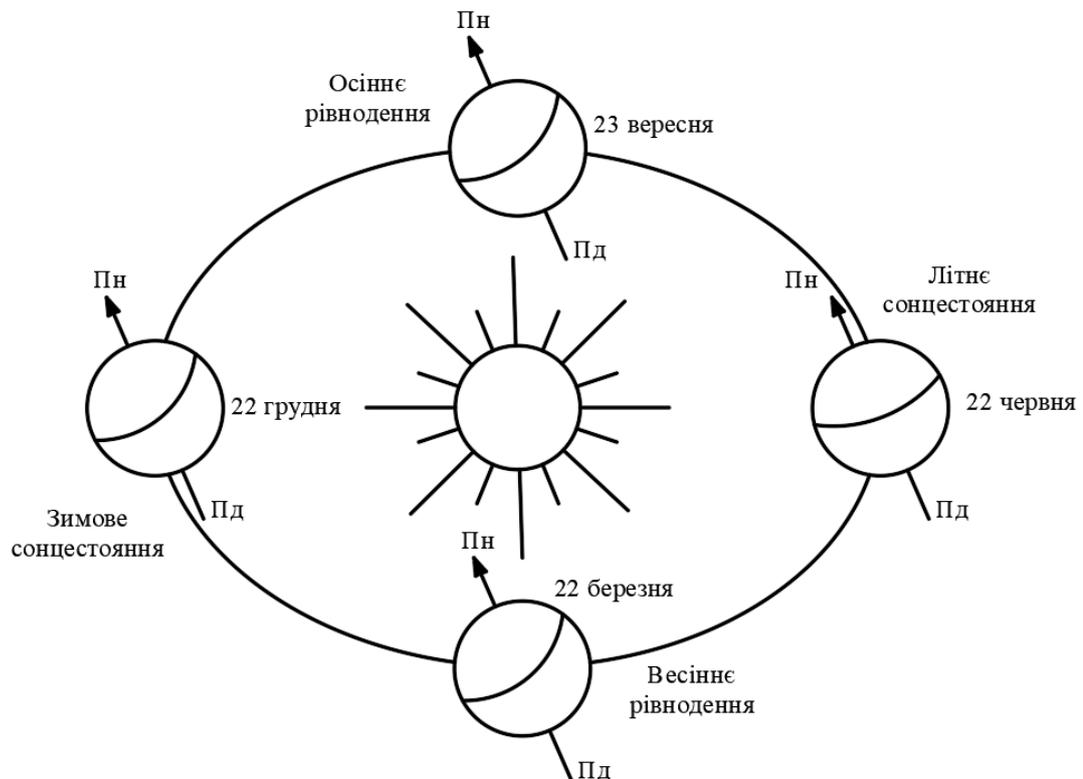


Рисунок 2.2 – Положення Землі в дні рівнодення та сонцестояння

В день зимового сонцестояння (22 грудня) північний полюс Землі нахилений від сонця на  $23,5^\circ$ , що призводить до того що всі точки які лежать на північ  $66,5^\circ$  північної широти, не отримують сонячне випромінювання протягом доби, в той час як регіони що знаходяться в межах  $23,5^\circ$  від південного полюсу отримують сонячне випромінювання 24 години на добу. Під час літнього сонцестояння (24 червня) ситуація повністю протилежна. В дні рівнодення обидва полюси планети знаходяться на однаковій відстані від Сонця і всі точки що лежать на земній поверхні отримують сонячне випромінювання 12 годин.

## 2.2. Позаземна сонячна радіація

Спектр сонячного випромінювання лежить в досить широкому діапазоні хвиль від 0,2 до 2,5 мкм. Інтенсивність сонячного випромінювання залежить від довжини хвилі. Функціональний зв'язок між інтенсивністю та довжиною хвилі визначається спектральним розподілом. Спектральний розподіл значною мірою впливає на роботу геліоустановок. Спектральний розподіл за межами земної поверхні називається позаземним або спектром нульових повітряних мас (AM0), який подібний спектру випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 5900 К. Відсотковий розподіл загального сонячного випромінювання в різних областях довжин хвиль наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Спектральний розподіл позаземної сонячної радіації

Випромінювання	Довжина хвилі	Відсоток від загального випромінювання
Ультрафіолетове	0,2-0,4 мкм	8,7 %
Видиме	0,4-0,7 мкм	38,2 %
Інфрачервоне	0,7-0,35 мкм	51,7

Пікова потужність 2074 Вт/м<sup>2</sup>/мкм досягається при довжині хвилі 0,48 мкм, що лежить в зеленій частині видимого спектру. Зміна відстані від Землі до Сонця спричиняє зміну кількості сонячного випромінювання що надходить на земну поверхню. Хоча ексцентриситет орбіти достатньо невеликий зміна в кількості сонячної енергії між перигелієм і афелієм становить близько 7 %, так 1 січня потік сонячної радіації на межі земної атмосфери вище ніж 1 липня. Також кількість сонячної радіації що надходить на земну поверхню залежить від щільності озонового шару, яка змінюється від дня до ночі та на яку впливає багато факторів які мають як періодичний характер так і багато інших що можуть мати різноманітний характер прояву в тому числі і техногенний.

## 2.3 Моделі сонячних надходжень на Земну поверхню

### 2.3.1 Аналіз існуючих моделей

У відкритих джерелах інформації наводиться велика кількість емпіричних кореляцій які визначають взаємозв'язок між метеорологічними величинами та сонячною радіацією. Оскільки для кожної конкретної цілі врахування тих чи інших метеорологічних параметрів є більш значним то це є важливим аспектом при виборі моделі. Емпіричні моделі можна поділити на чотири основні групи які класифікують їх в залежності від метеорологічного параметра на який вони спираються:

- моделі, що базуються на сонячному випромінюванні;
- моделі що базуються на хмарності;
- моделі, що базуються на температурі;
- моделі, що базуються на інших метеорологічних параметрах.

Серед метеорологічних параметрів найбільш значущими є години сонячного сьйва, наявність хмарного покриву та температура оточуючого середовища, тому моделі засновані на цих параметрах найбільш часто використовуються для прогнозування сонячної радіації і його компонентів в різних точках світу.

#### 2.3.1.1 Моделі, що базуються на сонячному випромінюванні

Більшість моделей для оцінки сонячної радіації використовують коефіцієнт сонячного сьйва  $\frac{S}{S_0}$ , який в загальному випадку описується наступним рівнянням

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (2.3)$$

де  $H$  – середньомісячна добова глобальна радіація на горизонтальній поверхні,  $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{день}}$ ;

$H_0$  – середньомісячна добова позаземна радіація на горизонтальній поверхні,  
 $\frac{\text{МДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{день}}$ ;

$a, b$  – емпіричні коефіцієнти, що коливаються в залежності від місця розташування об'єкту, що розглядається та автора моделі;

$S$  – місячна середньодобова тривалість сонячного сяйва, год.

Середньомісячна добова позаземна радіація на горизонтальній поверхні може бути визначена рівнянням

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \dots \left[ \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \varphi \sin \delta \right], \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{день}}, \quad (2.4)$$

де  $\omega_s$  – годинний кут заходу сонця, °;

$\delta$  – кут сонячного схилення, °;

$\varphi$  – географічна широта місцевості, °.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta), \quad (2.5)$$

Максимально можливу тривалість сонячного освітлення можна обчислити за допомогою рівняння

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_s, \text{ год.} \quad (2.6)$$

На основі даних отриманих з різних країн світу була запропонована модель з універсальними емпіричними коефіцієнтами

$$\frac{H}{H_0} = 0,18 + 0,62 \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (2.7)$$

Також за результатами спостережень було встановлено залежність емпіричних коефіцієнтів зі співвідношенням  $\frac{S}{S_0}$

$$a = 0,10 + 0,24 \left( \frac{S}{S_0} \right), \quad (2.8)$$

$$b = 0,38 + 0,08 \left( \frac{S}{S_0} \right). \quad (2.9)$$

### 2.3.1.2. Моделі що базуються на хмарності

Хмари та погодні умови, що їх супроводжують, є одним із найважливіших атмосферних явищ, які обмежують доступність сонячної радіації на поверхні землі. Хмарність як граничний фактор спричиняє розподіл і розсіювання сонячної радіації, що досягає атмосфери і впливає на кількість отриманої радіації на земній поверхні. Дані про хмари регулярно отримуються за допомогою метеорологічних супутників, тому був розроблений цілий ряд моделей для оцінки сонячної радіації заснований на спостереженнях за хмарами в різних шарах атмосфери та їх типами.

На основі даних з багатьох точок земної поверхні пропонується універсальне рівняння

$$\frac{H}{H_0} = 0,803 - 0,340C - 0,458C^2 \quad (2.10)$$

де  $C$  – середня загальна хмарність протягом денних спостережень, при цьому вводиться обмеження, що  $C \leq 0,8$ .

Зазначені моделі сонячного випромінювання дозволяють оцінити середньодобові значення сонячних надходжень в той час як для окремих цілей необхідно знати додатково погодинні значення сонячної радіації, для цих задач можуть бути використані моделі представлені Пелтріджем і Прокторсом. Дані моделі для прогнозування сонячних надходжень використовують сонячний кут, довжину доби та фактор хмарності. Погодинні значення прямої та дифузної радіації можна визначити з рівнянь

- Пряма радіація

$$I_b = 3,42286 \left[ 1 - \exp(-0,075(90 - \theta)) \right] \quad (2.11)$$

- Дифузна радіація

$$I_d = 0,00913 + 0,0125(90 - \theta) + 0,723CF \quad (2.12)$$

Сумарна добова радіація а горизонтальній поверхні обчислюється рівнянням

$$H = (1 - CF) \int_{sunrise}^{sunset} I_b(\theta) \cos \theta dt + \int_{sunrise}^{sunset} I_d(\theta) dt, \text{ Вт/м}^2 \quad (2.13)$$

де  $CF$  – фактор хмарності.

Фактор хмарності змінюється від 0 для ясного неба до 1 для хмарного неба, цей параметр можна отримати використовуючи кількість хмарних днів у кожному місяці та хмарність. Покриття хмарами спостерігається кожні три години в трьох різних діапазонах: (0-2) окта, (3-6) окта та (7-8) окта, щоб перетворити хмарний покрив в фактор хмарності використовують рівняння

$$CF = \frac{(n_1) + 4,5(n_2) + 7,5(n_3)}{8(n_1 + n_2 + n_3)}, \text{ в. о.}, \quad (2.14)$$

де  $n_1, n_2, n_3$  – загальна кількість днів у кожному місяці які потрапляють в задані діапазони.

### 2.3.1.3 Моделі що базуються на температурі

Оскільки дані про хмарність доступні не для всіх регіонів, науковцями були запропоновані моделі, що базуються на загальнодоступних даних, таких як температура повітря. Завдяки загальній доступності добових максимальних і мінімальних температур повітря, було запропоновано декілька емпіричних методів оцінки сонячної енергії від змінних чинників, особливо для різних місяців, де добова температура повітря є змінною.

Моделі на основі температури враховують різницю максимальна і мінімальна температура безпосередньо пов'язані з частка позаземного випромінювання, отриманого на земному рівні. Однак існують інші фактори, крім сонячного випромінювання, які впливають на перепади температур, такі як хмарність, вологість, широта, висота, топографія або близькість до великої водойми.

При використанні тільки максимальної та мінімальної температури повітря сонячну радіацію, можна знайти з наступного рівняння

$$\frac{H}{H_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0,5}, \quad (2.15)$$

де  $T_{\max}$  – максимальна температура протягом доби, °C;

$T_{\min}$  – мінімальна температура протягом доби, °C;

$a$  – емпіричний коефіцієнт, який приймають на рівні 0,17 для посушливих і напів посушливих регіонів, 0,16 для внутрішніх регіонів та 0,19 для прибережних регіонів.

Також була запропонована модель, що враховує залежність температури та атмосферного тиску, і в загальному випадку описується рівнянням

$$\frac{H}{H_0} = K_{\Gamma} (T_{\max} - T_{\min})^{0,5}, \quad (2.16)$$

де  $K_{\Gamma}$  – функція зміни атмосферного тиску, в. о.

$$K_{\Gamma} = k_{\Gamma a} \left( \frac{P_s}{P_0} \right)^{0,5}, \quad \text{в. о.} \quad (2.17)$$

$P_s$  – атмосферний тиск місцевості, кПа;

$P_0$  – нормальний атмосферний тиск на рівні моря (101,3 кПа);

$k_{\Gamma a}$  – емпіричний коефіцієнт, який встановлюється на рівні 0,17 для внутрішніх регіонів та 0,20 для прибережних, в. о.

Однак зазначені моделі дозволяють оцінити лише добові та місячні суми надходження сонячної радіації на земну поверхню, однак не дають змогу оцінити погодинні значення, що є важливим моментом для моделювання роботи сонячної панелі, тому розглядаються моделі, які дозволяють отримати погодинні значення сонячних надходжень.

## 2.4 Моделі точного прогнозування сонячної радіації

### 2.4.1 Модель ASHARE 2001

Більшість теоретичних моделей, використовують сонячну константу ( $E_{sc}$ ). Сонячна константа – це потік сонячної радіації на поверхню, що розташована перпендикулярно сонячним променям над земною атмосферою

на середній відстані від Землі до Сонця, що становить  $149,5 \cdot 10^6$  км. В наш час прийнято значення сонячної константи  $1367 \text{ Вт/м}^2$ .

Оскільки орбіта Землі має еліптичну форму то її позаземний променевий потік ( $E_0$ ) змінюється протягом року від  $1413 \text{ Вт/м}^2$  3 січня за найменшої відстані між Землею та Сонцем (афелій) до  $1332 \text{ Вт/м}^2$  4 липня, коли відстань максимальна (перигелій), для визначення позаземного променевого потоку в кожен день року використовується емпірична залежність

$$E_0 = E_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \left[ 360^\circ \frac{(n-3)}{365} \right] \right), \text{ Вт/м}^2, \quad (2.18)$$

де  $n$  – порядковий номер розрахункової доби року, що відраховується від 1 січня.

Також протягом року змінюється і орбітальна швидкість Землі, тому утворюється різниця між сонячним часом ( $AST$ ) та локальним часом ( $LST$ ) об'єкта розрахунку. Перехід від локального часу до сонячного виконується за допомогою рівняння часу та включає в себе два етапи: до локального часу необхідно додати рівняння часу та ввести поправку на довготу місцевості ( $LON$ ). Поправка на довготу місцевості складає 4 хвилини на кожен градус різниці між локальною довготою та довготою стандартного меридіану цього часового поясу, що знаходиться кожні  $15^\circ$  від  $0^\circ$  на Гринвічі. Сонячний та локальний часи пов'язані між собою рівнянням, що має наступний вигляд

$$AST = LST + \frac{ET}{60} + \left( \frac{LSM - LON}{15} \right), \quad (2.19)$$

де  $ET$  – рівняння часу, десяткові хвилини;

$LST$  – локальний сонячний час, десяткові години;

$LSM$  – довгота стандартного меридіану (для часового поясу GMT+2 складає  $30^\circ$ ),  $^\circ$  або рад;

$LON$  – локальна довгота об'єкту розрахунку [2],  $^\circ$  або рад.

Рівняння часу має наступний вигляд

$$ET = 2,2918 \cdot (0,0075 + 0,1868 \cos(B) - 3,2077 \sin(B) - \dots \dots - 1,4615 \cos(2B) - 4,089 \sin(2B)), \quad (2.20)$$

де  $B$  – добовий кут [1].

$$B = 360^\circ \frac{n-1}{365}, \quad (2.21)$$

Екваторіальна площина Землі зміщена відносно площини орбіти, і характеризується кутом сонячного схилення ( $\delta$ ), ця величина також не є постійною і змінюється протягом року в межах  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$  та впливає на зміну тривалості періодів темряви та світла впродовж доби.

Сонячне схилення для будь-якої доби року з точністю достатньою для інженерних розрахунків можна вирахувати за емпіричною формулою

$$\delta = 23,45 \sin\left(360^\circ \frac{n+284}{365}\right), \quad (2.22)$$

Сумарне короткохвильове випромінювання, що досягає земної поверхні можна визначити так:

$$E_t = E_{DN} \cos \theta + E_d + E_r, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.23)$$

де  $E_{DN}$  – пряме сонячне випромінювання на площину, Вт/м<sup>2</sup>;

$\theta$  – кут падіння сонячного випромінювання на поверхню, °;

$E_d$  – дифузне сонячне випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>;

$E_r$  – віддзеркалене від поверхні землі сонячне випромінювання Вт/м<sup>2</sup>.

Біля поверхні землі в безхмарний день нормальне пряме випромінювання сонячної радіації на площину можна визначити як

$$E_{DN} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\sin \beta}\right)}, \text{ кВт/м}^2, \quad (2.24)$$

де  $A$  – видиме сонячне випромінювання при масі повітря  $m = 0$ , Вт/м<sup>2</sup>;

$B$  – атмосферний коефіцієнт екстинкції, в. о;

$\beta$  – висота Сонця на небі, °.

За межами земної атмосфери спектральний розподіл випромінювання приблизно тотожній випромінюванню абсолютно чорного тіла з температурою 6000 К. Найбільша інтенсивність сонячного випромінювання досягається при довжині хвилі 451 нм, тобто в зеленій частині спектру і сягає 2130 Вт/(м<sup>2</sup>К).

При проходженні випромінювання через земну атмосферу воно ослаблюється за рахунок розсіяння в атмосфері та часткового поглинання молекулами та твердими частками що входять до складу атмосфери. Величину ослаблення опромінення умовно можна поділити на дві складові частини: хімічний склад атмосфери в момент спостереження та довжина атмосферного шляху. Довжину атмосферного шляху можна виразити через масу повітря ( $m$ ), яка є відношенням маси атмосфери на шляху від Сонце - Земна поверхня до маси, якщо б сонячне випромінювання випромінювалось над рівнем моря ( $m=1$ ). Для більшості розрахункових точок на земній поверхні маса повітря в будь-який час дорівнює косекансу сонячної висоти помноженої на відношення барометричного тиску до стандартного тиску.

Значення видимого сонячного випромінювання при масі повітря  $m = 0$  та атмосферного коефіцієнта екстинкції наводиться в [2] і залежно від місяця для кого відбувається розрахунок приймає наступні значення, що наведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Емпіричні значення величин для кожного місяця

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень
$A, \text{Вт/м}^2$	1230	1215	1186	1136	1104	1088
$B, \text{в. о.}$	0,142	0,144	0,156	0,180	0,196	0,205
$C, \text{в. о.}$	0,058	0,060	0,071	0,097	0,121	0,134
Місяць	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
$A, \text{Вт/м}^2$	1085	1107	1151	1192	1221	1233
$B, \text{в. о.}$	0,207	0,201	0,177	0,160	0,149	0,142
$C, \text{в. о.}$	0,136	0,122	0,092	0,073	0,063	0,057

Примітка: довідникові коефіцієнти наведені для 21 дня кожного відповідного місяця, при розрахунках випромінювання в отримання адекватних значень в інші дні необхідно робити інтерполяцію.

Кут падіння сонячного випромінювання для будь-якої поверхні визначається як кут між сонячними променями, що падають та лінією нормальною до цієї поверхні. Для будь-якої поверхні кут падіння пов'язаний з висотою сонця на небі, азимутом Сонця і нахилом поверхні

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma, \quad (2.25)$$

де  $\gamma$  – азимут Сонця, °;

$\Sigma$  – кут нахилу поверхні, що опромінюється, °.

При умові, що розрахункова поверхня, яка опромінюється сонячними променями має кут нахилу  $0^\circ$ , тобто лежить горизонтально до поверхні землі, формула приймає вигляд

$$\cos \theta_H = \sin \beta \quad (2.26)$$

Якщо поверхня має кут нахилу  $90^\circ$  (розташовується вертикально до площини земної поверхні) рівняння приймає вигляд

$$\cos \theta_V = \cos \beta \cos \gamma \quad (2.27)$$

Азимут Сонця можна визначити за формулою

$$\gamma = \varphi - \psi, \quad (2.28)$$

де  $\varphi$  – сонячний азимут, °;

$\psi$  – азимут поверхні, °.

$$\cos \varphi = \frac{\sin \beta \sin L - \sin \delta}{\cos \beta \cos L} \quad (2.29)$$

де  $L$  – локальна широта поверхні що опромінюється, °.

Висота Сонця на небі визначається як

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (2.30)$$

де  $H$  – видимий сонячний кут;

$$H = 15(AST - 12) \quad (2.31)$$



### 2.4.2 Модель Hottel

Модель що була представлена Н. С. Hottel у 1976 році пропонує визначити почасову добову радіацію для «чистого неба», тобто не враховуючи вплив атмосфери на розсіювання, поглинання та ін. В цей самий час метод оцінює випромінювання що проходить через чисту атмосферу і враховує зенітний кут та висоту, що розраховується для стандартної атмосфери та чотирьох типів клімату.

Коефіцієнт пропускання атмосфери для випромінювання має наступний вигляд

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-k}{\cos \theta_z}\right) \quad (2.37)$$

де  $a_0, a_1, k$  – константи, що розраховуються для стандартної атмосфери з видимістю 23 км з  $a_0^*, a_1^*, k^*$  для висот спостерігача менше ніж 2,5 км;

$\theta_z$  – зенітний кут, кут між вертикаллю і лінією до Сонця, тобто кут падіння променя випромінювання на горизонтальну поверхню, °.

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta, \quad (2.38)$$

де  $\omega$  – часовий кут, кутове зміщення Сонця на схід або на захід від місцевого меридіана внаслідок обертання Землі навколо своєї осі зі швидкістю 15° на годину; з ранку від'ємні значення, після обіду додатні, °;

$\varphi$  – широта місцевості, де встановлена поверхня, що опромінюється, °.

Якщо поверхня, що опромінюється має нахил відносно горизонталі то кут падіння можна розрахувати наступним чином

Через зенітний кут Сонця

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma), \quad (2.39)$$

де  $\theta$  – кут падіння, кут між променем випромінювання на поверхню та нормаллю до цієї поверхні, °;

$\beta$  – кут нахилу поверхні, що опромінюється, °

$\gamma$  – поверхневий азимутальний кут, відхилення проекції на горизонтальну площину нормалі до поверхні від місцевого меридіана, з нулем на південь, на схід від’ємні значення кутів і на захід додатні, °;

$\gamma_s$  – сонячний азимутальний кут, кутове зміщення з півдня проекції пучка випромінювання на горизонтальну площину. Переміщення на схід від півдня від’ємні значення, а на захід від півдня додатні.

Через відношення різних кутів

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \dots \\ \dots + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \dots & \quad (2.40) \\ \dots + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega, & \quad ^\circ. \end{aligned}$$

Кут сонячного азимута  $\gamma_s$  може мати значення в діапазоні від  $180^\circ$  до  $-180^\circ$ . Для північних або південних широт між  $23,45^\circ$  і  $66,45^\circ$   $\gamma_s$  буде між  $90^\circ$  і  $-90^\circ$  протягом днів тривалістю менше 12 годин; для днів із більш ніж 12 годинами між сходом і заходом сонця,  $\gamma_s$  буде більшим за  $90^\circ$  або меншим за  $-90^\circ$  рано та пізно вдень, коли сонце знаходиться на північ від лінії схід-захід у північній півкулі або на південь від лінії схід-захід у південній півкулі. Таким чином,  $\gamma_s$  від’ємне, коли годинний кут від’ємний, і додатне, коли годинний кут додатний. Знакова функція в рівнянні (2.41) додатня, якщо  $\omega$  додатне, і від’ємне, якщо  $\omega$  від’ємне:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left( \frac{\cos \theta_z \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \varphi} \right) \right|, ^\circ. \quad (2.41)$$

$$a_0^* = 0,4237 - 0,00821(6 - A)^2 \quad (2.42)$$

$$a_1^* = 0,5055 + 0,00595(6,5 - A)^2 \quad (2.43)$$

$$k^* = 0,2711 + 0,01858(2,5 - A)^2 \quad (2.44)$$

де  $A$  – висота спостерігача (площини, що опромінюється), враховується висота встановлення площини та висоту над рівнем моря географічної координати в якій встановлюється площина, км.

Для врахування кліматичних умов використовуються емпіричні коефіцієнти, що залежать від кліматичної зони та які мають наступні відношення

$$r_0 = \frac{a_0}{a_0^*} \quad (2.45)$$

$$r_1 = \frac{a_1}{a_1^*} \quad (2.46)$$

$$r_k = \frac{k}{k^*} \quad (2.47)$$

Значення емпіричних коефіцієнтів наведено в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 – Емпіричні коефіцієнти коригування кліматичної зони

Тип клімату	$r_0$	$r_1$	$r_k$
Тропічний	0,95	0,98	1,02
Середньоширотне літо	0,97	0,99	1,02
Субарктичне літо	0,99	0,99	1,01
Середгьоширотна зима	1,03	1,01	1

Таким чином інтенсивність сонячного випромінювання на поверхню нормальну до сонячних променів можна визначити як

$$G_{snb} = G_{on} \tau_b \quad (2.48)$$

де  $G_{on}$  – позаземне випромінювання, визначене для  $i$ -го дня.

Позаземне випромінювання можна визначити як

$$G_{on} = \begin{cases} G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \\ G_{sc} (1,00011 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + \dots \\ \dots + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B) \end{cases} \quad (2.49)$$

де  $G_{sc} \equiv E_{sc}$  – сонячна константа 1367 Вт/м<sup>2</sup>;

$B$  – добовий кут та визначається за формулою (4).

Друге рівняння має менше похибку, але для більшості інженерних розрахунків можна використовувати перше рівняння, що задовольняє точності для даного типу розрахунків.

Інтенсивність прямого випромінювання визначається так:

$$G_b = G_{on} \tau_b \cos \theta_z \quad (2.50)$$

Дифузне випромінювання можна визначити за формулою

$$G_d = G_b \tau_d \quad (2.51)$$

де  $\tau_d$  – відношення дифузного випромінювання до позаземного випромінювання в горизонтальній площині.

$$\tau_d = \frac{G_d}{G_0} = 0,271 - 0,294\tau_b \quad (2.52)$$

### 2.4.3 Модель ASHARE 2009

В даній моделі як і в інших розглядається два види випромінювання пряме та дифузне. Під прямим випромінюванням розуміють випромінювання, що надходить на поверхню безпосередньо від сонячного диска, а дифузним усе випромінювання, що надходить від іншої частини неба.

Пряма сонячна радіація, що надходить на горизонтальну поверхню може бути визначена як

$$E_b = E_0 \exp\left[-\tau_b m^{ab}\right], \text{ Вт/м}^2, \quad (2.53)$$

А дифузна сонячна радіація на горизонтальній поверхні за формулою

$$E_d = E_0 \exp\left[-\tau_d m^{ad}\right], \text{ Вт/м}^2, \quad (2.54)$$

де  $E_0$  – позаземний променевий потік, що можна визначити за формулою (1), Вт/м<sup>2</sup>;

$\tau_b, \tau_d$  – псевдо оптичні глибини прямого та дифузного випромінювання, залежать від пори року, в. о;

$m$  – відносна повітряна маса, в. о;

$ab, ad$  – показники прямої та дифузної повітряних мас, в. о.

Відносна маса повітря може бути визначена так:

$$m = \frac{1}{\sin \beta + 0,50572 \cdot (6,07995 + \beta)^{-1,6364}}, \text{ в. о.}, \quad (2.55)$$

де  $\beta$  – кут сонячної висоти, °.

Показники прямої та дифузної повітряних мас розраховуються з емпіричних відношень

$$ab = 1,219 - 0,043\tau_b - 0,151\tau_d - 0,204\tau_b\tau_d, \text{ в. о.}, \quad (2.56)$$

$$ad = 0,202 + 0,852\tau_b - 0,007\tau_d - 0,357\tau_b\tau_d, \text{ в. о.} \quad (2.57)$$

Значення оптичних глибин для прямої та дифузної радіації наводяться в [4] для 21 дня кожного місяця, а для інших днів визначається інтерполяцією

Таблиця 2.4 – Псевдо оптичні глибини атмосфери[4]

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень
$\tau_b$ , в. о	0,325	0,349	0,383	0,395	0,448	0,505
$\tau_d$ , в. о	2,461	2,316	2,176	2,175	2,028	1,892
Місяць	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
$\tau_b$ , в. о	0,556	0,593	0,431	0,373	0,339	0,320
$\tau_d$ , в. о	1,779	1,679	2,151	2,317	2,422	2,514

Сумарна сонячна радіація на похилій поверхні що опромінюється складається з трьох компонентів: променевого, дифузного та віддзеркаленого і може бути знайдена таким чином

$$E_t = E_{t,b} + E_{t,d} + E_{t,r}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.58)$$

Дифузний компонент може бути отриманий з геометричного співвідношення

$$E_{t,b} = E_b \cos \theta, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.59)$$

Дифузний компонент для оцінки є більш складним через анізотропність яскравості неба, так горизонт та зона, що знаходиться поблизу сонячного диску як правило завжди яскравіші. Тому для оцінки дифузного компонента використовується відношення ( $Y$ ) дифузного випромінювання при ясному небі на вертикальну поверхню до дифузного при ясному небі на горизонтальну поверхню, що є простою функцією кута падіння

$$E_{t,d} = E_d Y, \text{ Вт/м}^2. \quad (2.60)$$

Відношення дифузного випромінювання при ясному небі на вертикальну поверхню до дифузного при ясному небі на горизонтальну поверхню маю наступну залежність

$$Y = \max(0,45; 0,55 + 0,437 \cos \theta + 0,313 \cos^2 \theta), \text{ Вт/м}^2. \quad (2.61)$$

Для неvertикальних поверхонь з достатньою точністю дифузний компонент можна розрахувати за формулами

При куті нахилу поверхні, що опромінюється  $\Sigma \leq 90^\circ$

$$E_{t,d} = E_d (Y \sin \Sigma + \cos \Sigma), \text{ Вт/м}^2, \quad (2.62)$$

при  $\Sigma > 90^\circ$

$$E_{t,d} = E_d Y \sin \Sigma, \text{ Вт/м}^2. \quad (2.63)$$

Віддзеркалений компонент незалежно від орієнтації поверхні визначається як

$$E_{t,r} = (E_b \sin \beta + E_d) \rho_g \frac{1 - \cos \Sigma}{2}, \text{ Вт/м}^2. \quad (2.64)$$

## 2.5 Перевірка отриманих результатів

На основі описаних моделей були проведені розрахунки, які проводилися для кожного дня року. Протягом доби значення інтенсивності сонячного випромінювання розраховувалися в часовому інтервалі від 6:00 до

20:00 з інтервалом в 1 годину. За рахунок сумування погодинних значень було отримано кількість сонячної енергії, яка надходить на горизонтальну поверхню площею в  $1 \text{ м}^2$ . Середньомісячні значення сонячних надходжень знаходилися шляхом усереднення усіх значень за заданий місяць. Отримані результати середньомісячних сум порівнюються з даними, що надає Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (НАСА) [5]. Результати розрахунків приведені на рисунку 2.3.

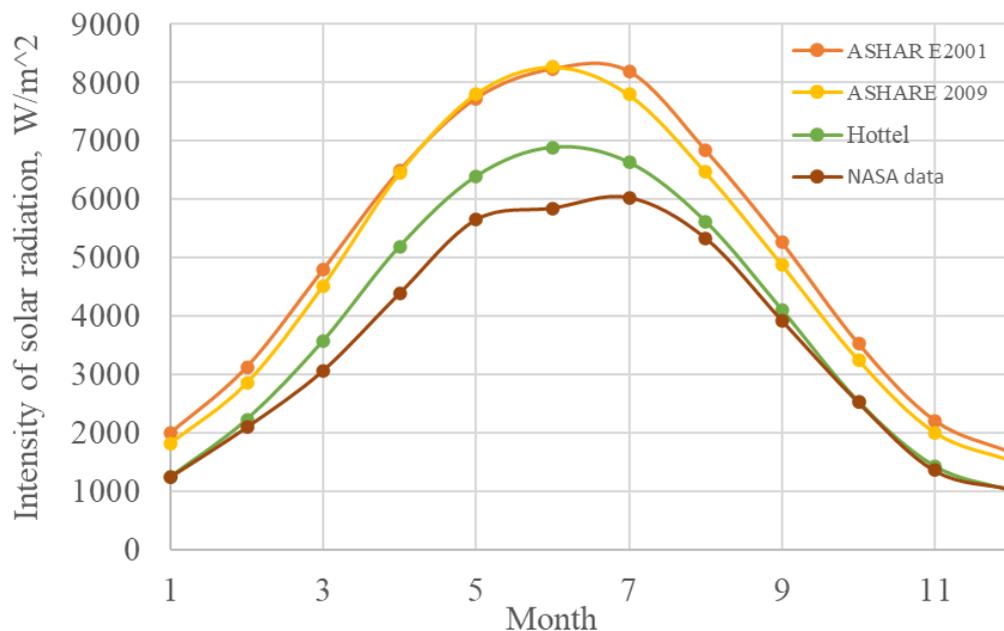


Рисунок 2.3 – Дані про сонячне надходження за трьома моделями та даними НАСА

Також дані розрахунки перевіряються з експериментальними даними. Експериментальні дані були отримані за допомогою метеопосту, який встановлений на території Національного університету «Одеська політехніка». Зазначений метеопост фіксував значення про надходження сонячної радіації з інтервалом пів години, протягом цих пів годин апаратна частина метеопосту зчитує дані з інтервалом в 5 секунд та усереднює отримані значення. Для зручності порівняння величин, отримані дані було приведено до погодинних значень інтенсивності сонячної радіації. Отримані дані було усереднено на погодинних інтервалах для кожного місяця з квітня по вересень та порівняно з трьома представленими моделями, за результатами порівняння було вираховані середні похибки, які представлені на рисунку 2.4.

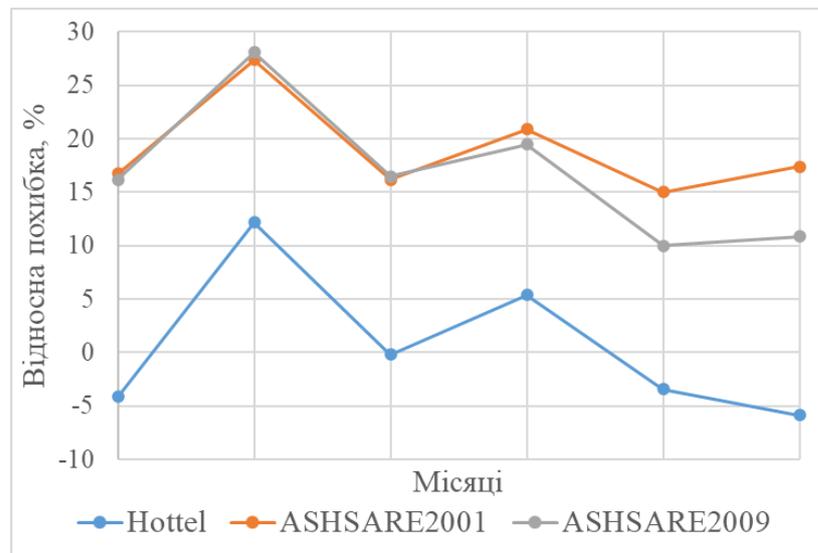


Рисунок 2.3 – Значення середніх похибок розрахункових моделей з експериментальними даними для діапазону місяців з квітня по вересень

Як можна побачити з рисунку 2.3 найменші середні похибки по місяцях має представлена модель Hottel, середні коливання похибки для всіх місяців окрім травня лежить в межах  $\pm 5\%$ , що є достатньо прийнятним результатом. Таке різке збільшення похибки в травні може бути обґрунтоване нетиповими погодними умовами для даного місяцю, або проблемами в роботі апаратної частині метеопоста, для виявлення причин збільшення похибки аналізується місячний графік надходження сонячної інсоляції, який представлений на рисунку 2.4, та був отриманий при детальній обробці даних з метеопоста.

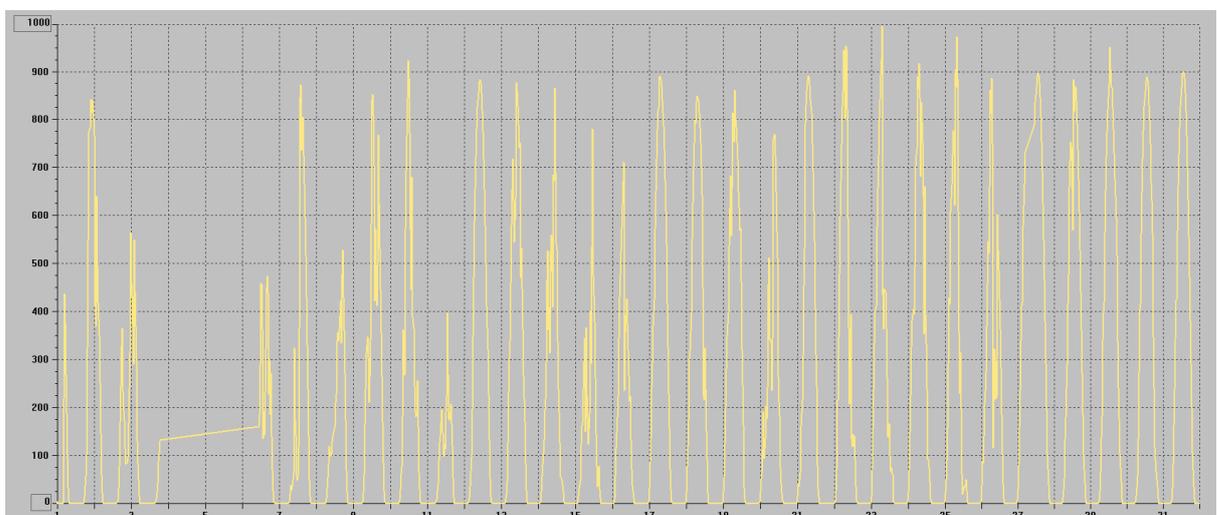


Рисунок 2.4 – Місячний графік надходження сонячної інсоляції за травень місяць

Як можна побачити з рисунку на початку місяця в період з 4 по 6 травня в апаратній частині трапилася помилка, яка призвела до врахування рівня інсоляції приблизно на 10-15% від тієї, що могла бути фактично в ті дні. Оскільки відновлення даних за цей діапазон є неможливим, то для коригування отриманої похибки проводиться аналіз рівня сонячної радіації за 1 добу дані якої не є пошкодженими, і за ту саму добу беруться дані з розрахункової моделі, порівняння отриманих даних наводиться на рисунку 2.5.

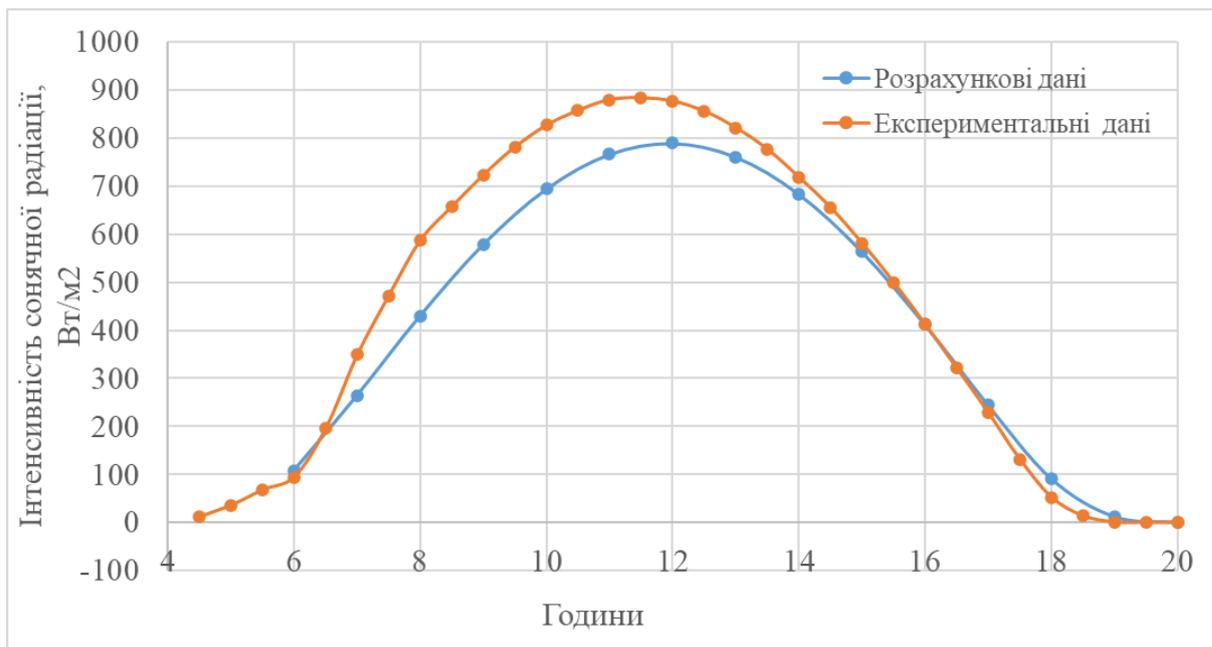


Рисунок 2.5 – Порівняння експериментальних та розрахункових значень для 9 травня

В якості дня для порівняння було обране 9 травня, оскільки цей день, як видно з рисунку 2.5 був абсолютно безхмарний, що дає можливість найбільш точно оцінити різницю між даними розрахованими за моделлю та експериментальними даними. Не дивлячись на візуально значні розходження в інтенсивності сонячної радіації, похибка за середньо добовою сумою надходжень сонячної радіації складає 5,2 %, що в цілому є достатньо прийнятною величиною.

Детальний аналіз відносної похибки для липня місяця, показав також що у апаратній частині метеопоста відбувалися незначні систематичні збої у

вимірюванні протягом декількох годин першої половини доби, що в результаті призводило до некоректного усереднення добової інсоляції, а отже реальна похибка буде менша.

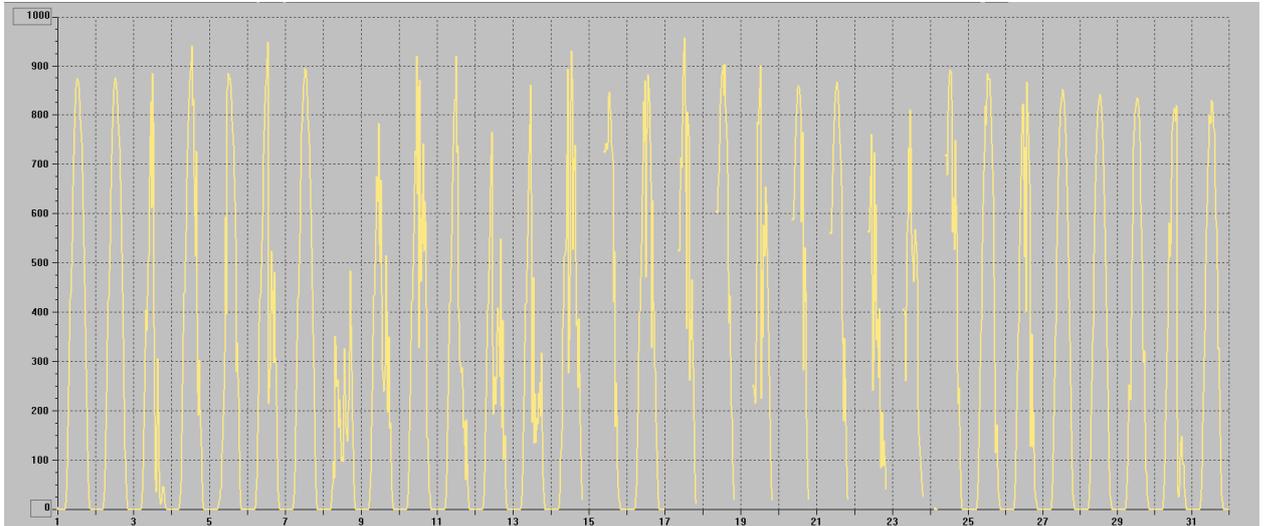


Рисунок 2.6 – Місячний графік надходження сонячної інсоляції за липень  
місяць

Порівняння інших моделей з експериментальними даними не є доцільним, оскільки розраховані місячні середньодобові суми надходження сонячної радіації набагато більші за значення трьох наведених моделей, результати розрахунків за окремими моделями представлені на рисунках 2.7-2.9, порівняльний графік середньодобових сум наведено на рисунку 2.10.

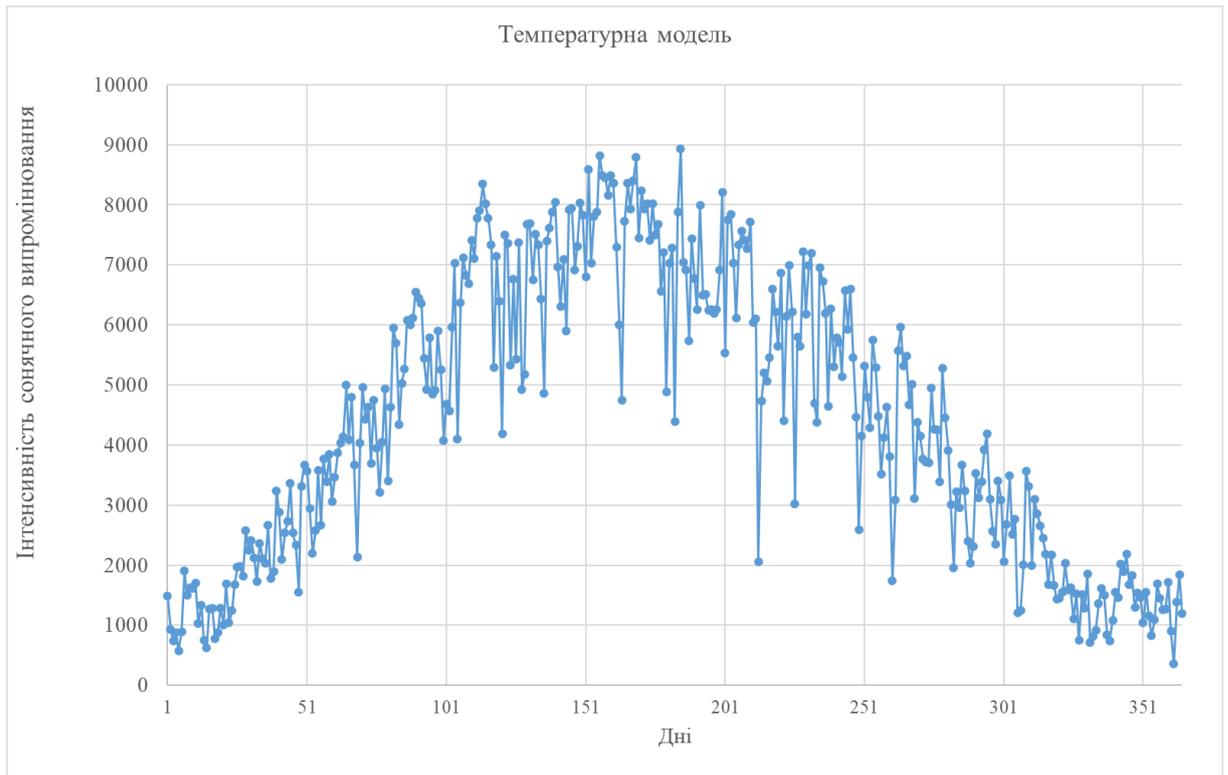


Рисунок 2.7 – Добові суми надходження сонячної радіації вираховані за допомогою моделі, що базується на температурі

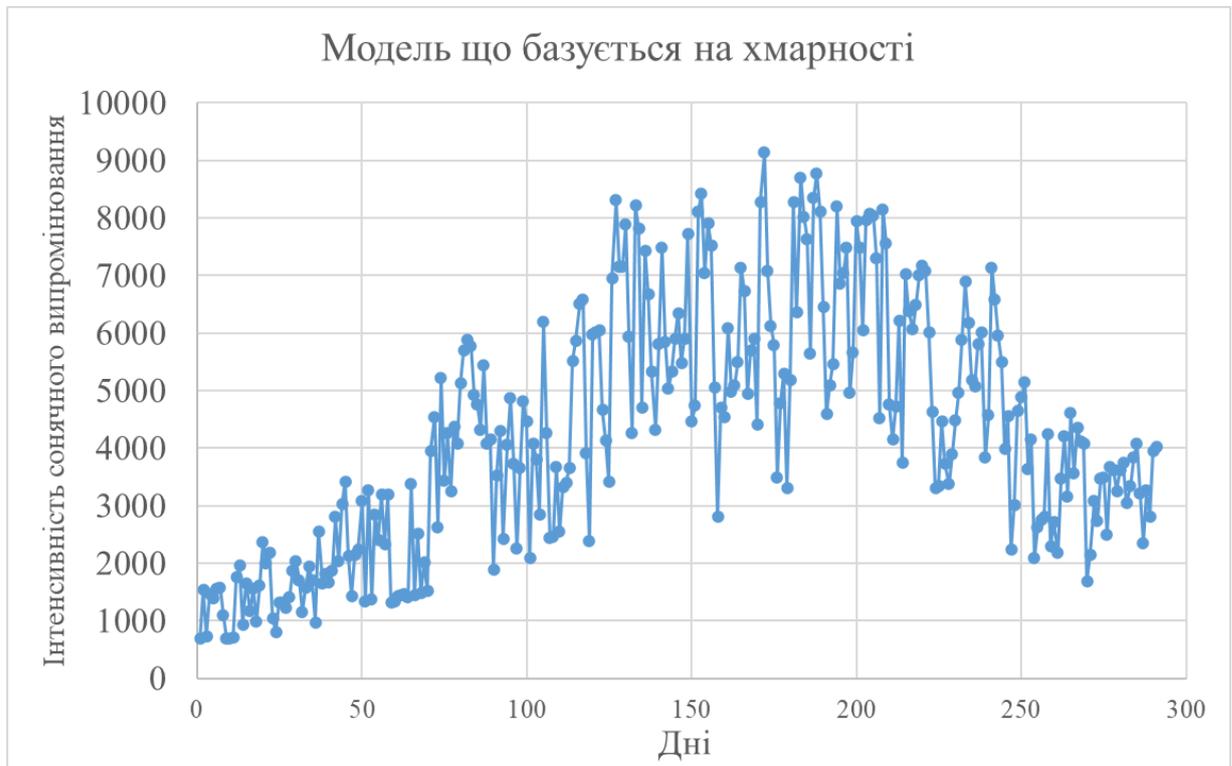


Рисунок 2.7 – Добові суми надходження сонячної радіації вираховані за допомогою моделі, що базується на хмарності

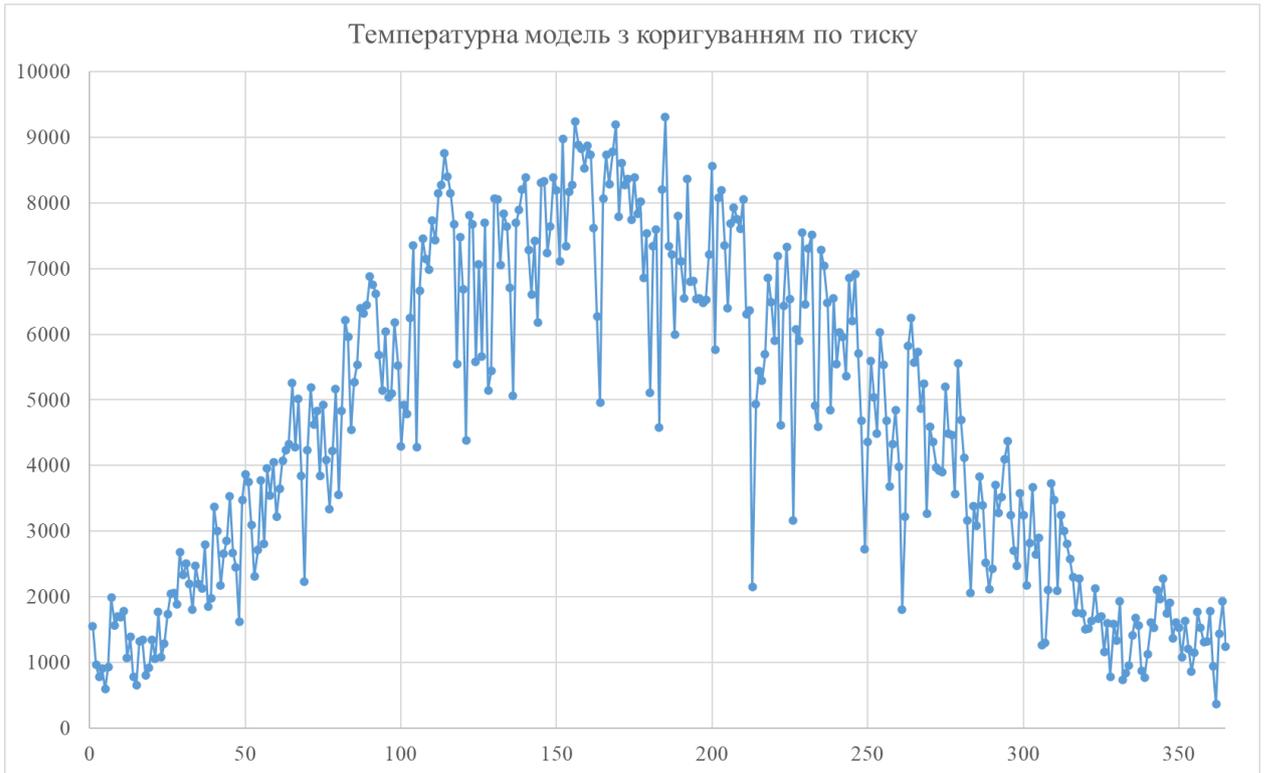


Рисунок 2.9 – Добові суми надходження сонячної радіації вираховані за допомогою моделі, що базується на температурі з коригуванням по тиску

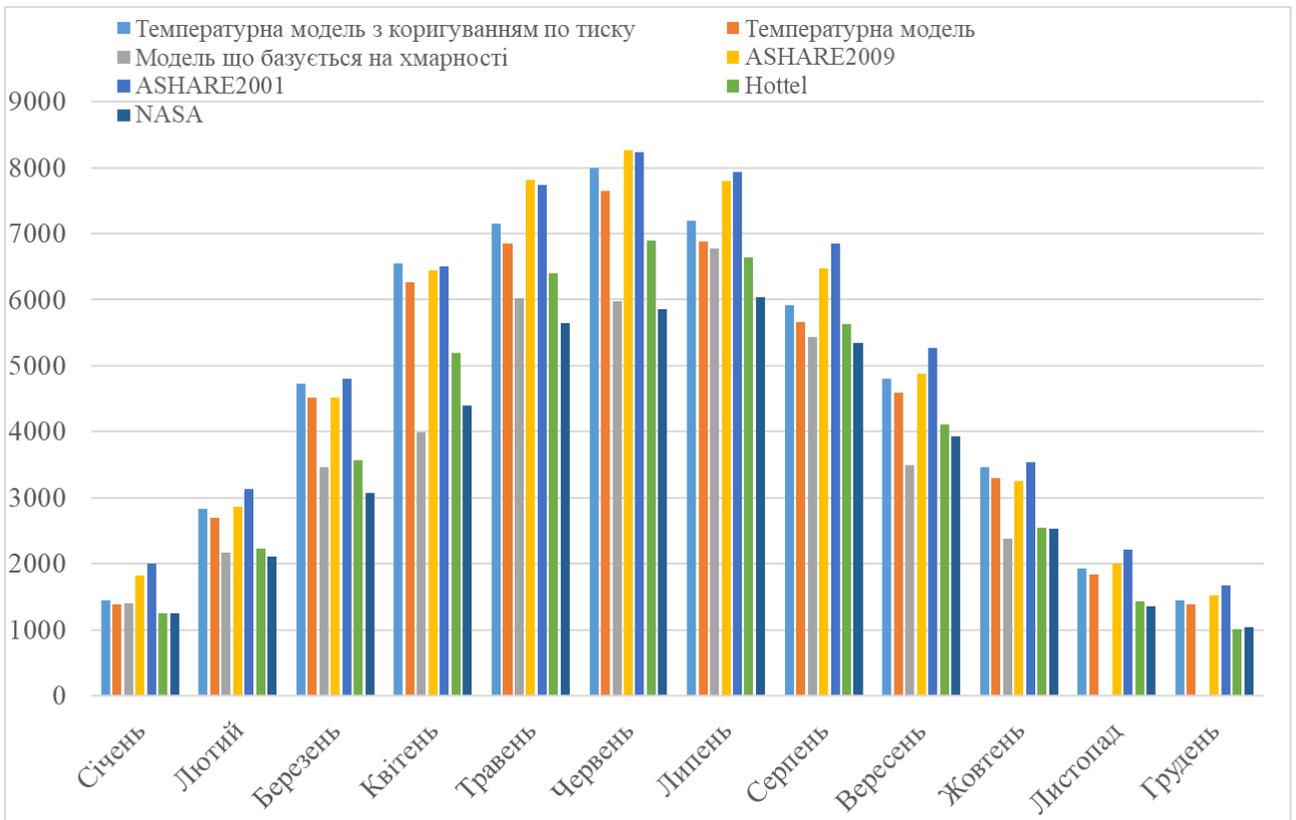


Рисунок 2.10 – Порівняльний графік середньодобових сум за представленими моделями

## Висновки до розділу 2

1. Визначення інтенсивності сонячної радіації в довільний момент часу є досить важкою математичною задачею, оскільки існує велика кількість факторів, які впливають на даний показник.

2. Впливові фактори можна поділити на дві групи, які є постійними і їх можна врахувати з достатньо великою точністю (обертання Землі навколо Сонця, обертання Землі навколо своєї вісі та ін.), а також фактори, які мають ймовірнісний характер, до них переважно відносяться метеорологічні показники регіону в даний момент часу.

3. Розроблені математичні моделі, які покликані враховувати ймовірнісні впливові фактори на інтенсивність сонячної радіації здебільшого є некоректними для розрахунку в наших регіонах, оскільки враховують емпіричні коефіцієнти, які визначаються для кожного окремого регіону, в той час як для нашого регіону доступні лише універсальні коефіцієнти, що дають дуже велику похибку.

4. В результаті проведення розрахунків за декількома різними моделями було встановлено, що кожна модель дає різні значення, які в окремих випадках навіть є недосяжними для розрахункового регіону. Порівняння отриманих даних з експериментальними даними, отриманими за допомогою метеорологічного поста, показали, що найбільш точною є модель Hottel, а її відносно великі похибки спричинені тимчасовою некоректною роботою метеорологічного посту.

5. Суттєві похибки розрахункових значень більш точних моделей, які використовуються в спеціалізованих закордонних програмних засобах, дозволяють зробити висновок про те, що при визначенні ефективності використання СФП з певною точністю додатково необхідно перевіряти точність програмної моделі на даних регіону для якого проводяться розрахунки.

## РОЗДІЛ 3

### ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Як було розглянуто у першому розділі, основним критерієм, що впливає на ефективність роботи фотоелектричних панелей, не враховуючи конструктивні особливості є робоча температура цієї самої панелі. Відповідно до міжнародних стандартів є різні програми лабораторних випробувань, які визначають робочі характеристик фотоелектричних панелей при різних показних оточуючого середовища в тому числі і робочої температури. В наш час найбільш поширеною є програма лабораторних випробувань STC (Standard Test Conditions) яка регламентує робочі показники при температурі 25°C та інтенсивності світлового потоку 1000 Вт/м<sup>2</sup>, що в реальних експлуатаційних умовах є майже недосяжним. Результати моделювання сонячного випромінювання, показують що значення у 1000 Вт/м<sup>2</sup> досягається лише в окремі літні дні, в той час як досвід експлуатації фотоелектричних панелей показує що перевищення температури понад нормовану в різних часових інтервалах доби може спостерігатися з квітня по жовтень, що в свою чергу буде викликати втрати генерації електричної енергії.

#### **3.1 Опис пристрою**

Для вирішення даної проблеми пропонується використання пристрою для підвищення ККД фотоелектричних панелей шляхом перетворення їх на гібридний колектор. Даний пристрій являє собою окремий модуль, який складається зі скла разом із дистанційним профілем який герметично кріпиться до зовнішньої частини фотоелектричної панелі. Таким чином над поверхнею фотоелектричної панелі утворюється замкнутий простір через який можна подавати теплоносії, для відбору теплової енергії з поверхні абсорбера в якості якого виступає кремнієві пластини фотоелектричної панелі. Замість скла можливе використання різних світлопрозорих матеріалів, з різними фізичними властивостями, що можуть знижувати коефіцієнт відбиття сонячного випромінювання з поверхні даного модуля або мати більшу

пропускну здатність для сонячного світла, як у випадку з над прозорим склом, також можливе використання матеріалів з більшою механічною міцністю та різних форм за рахунок чого можуть досягатися певні ефекти. Загальний вигляд пропонованого пристрою наведено на рисунку 3.1.

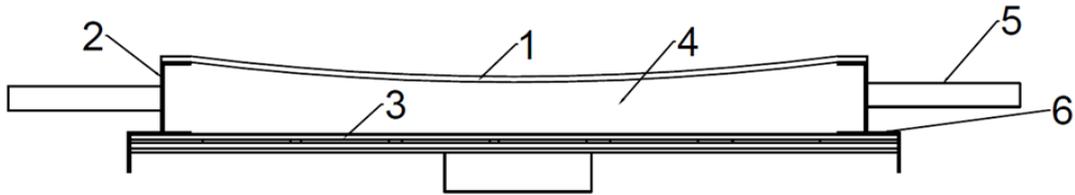


Рисунок 3.1 – Розріз пристрою для підвищення ККД фотоелектричних панелей

На рисунку 3.1 представлено загальний вигляд та конструкцію пристрою, який отримав державний патент на корисну модель № 152350 від 11.01.2023 року. В даному пристрої міститься світлопрозорий екран ввігнутої форми (поз. 1), така конструкція екрану була запропонована з міркувань збільшення надійності конструкції. Оскільки під час роботи даного модуля передбачається розширення в об'ємі теплоносія за рахунок фізичних властивостей, то дане явище буде викликати внутрішній тиск, що може призводити до руйнування та утворення тріщин в плоских поверхнях. Для протидії внутрішньому тиску в конструкції плоским екраном необхідним є встановлення додаткових перемичок всередині простору, що збільшують гідравлічний опір при циркуляції теплоносія, утворюють всередині фотоелектричних панелей зони додаткового затінення за рахунок не ідеальної провідності сонячних променів прозорими матеріалами, значно ускладнюють конструкцію та процес монтажу, а також за рахунок дуже щільного розташування кремнієвих осередків на підкладці, навіть при невеликих товщинах перемичок, торцева зона буде щільно закривати частину осередку, що буде сприяти підвищеній деградації модуля.

Окрім цього ввігнута поверхня даного модуля матиме більшу площу, в порівнянні з пласкою конструкцією, що сприятиме з однієї сторони збільшенню конвективної теплопередачі до оточуючого середовища, а з іншої сторони сприятиме збільшенню площі опромінення, що при розгляді різних задач може давати як свої позитивні так і негативні наслідки.

Дистанційний профіль позначено на рисунку 3.1 як (Поз.2), висота цього профілю прямо пропорційна об'єму теплоносія який буде проходити повз даний пристрій, що повинно визначатися в залежності від багатьох факторів таких як: інтенсивність сонячної радіації, в місці розташування, максимальна встановлена вихідна температура теплоносія, всі параметри що впливають на рівень конвективного теплообміну та інші.

Однак в даній конструкції, що представлено на рисунку дистанційний профіль, який має П-подібний вигляд, має кріплення безпосередньо до передньої частини фотоелектричної панелі. Аналіз продукції ринку фотоелектричних панелей, показує що сучасні компонування фотоелектричних панелей виконуються з максимальною щільністю, а отже частина П-подібного профілю, що має безпосередній контакт з поверхнею фотоелектричної панелі буде викликати затінення і всі наслідки аналогічні від затінення торцевою частиною перемички плаского екрану. Окрім цього верхня нависаюча частина при зміні кута нахилу Сонця, також буде викликати зону затінення, що матиме негативні наслідки для роботи фотоелектричної панелі, тому з урахуванням даних факторів, більш доцільним є встановлення даного профіля на існуючий алюмінієвий каркас, самої фотоелектричної панелі.

Оскільки окрім підвищення електричного ККД фотоелектричної панелі за рахунок зміни температурного режиму разом вирішується і задача відбору теплової енергії для покращення сумарних енергетичних характеристик фотоелектричних панелей, то профіль рекомендується виконувати з алюмінію, або хромованих матеріалів, оскільки дані матеріали мають низький коефіцієнт теплового випромінювання.

Теплоносій показаний на рисунку під (Поз.4). Теплоносій має повністю заповнювати весь простір, що утворюється в наслідок встановлення пристрою. В якості теплоносія може використовуватися будь-яка рідина з достатніми теплофізичними властивостями, однак за рахунок встановлення пристрою з зовнішньої частини фотоелектричної панелі, необхідно також враховувати і оптичні властивості теплоносія, а саме спектральний розподіл пропускання випромінювання, що для кожної рідини є індивідуальним. Використання різних рідин може давати свої переваги, так наприклад використання двохатомного спирту моноетиленгликолю ( $C_2H_6O_2$ ) дозволить залишати теплоносій в пристрої у зимовий час, оскільки температура замерзання даного спирту складає  $-25^{\circ}C$ , що в південних регіонах України буває вкрай рідко, однак застосування таких рідин потребуватиме замкненої системи, що в свою чергу ускладнюватиме конструкцію встановленням теплообмінних апаратів, і обмежуватиме рівень вхідної температури в пристрій кількістю відібраної теплової енергії, а також буде сприяти зменшенню ефективності використання системи за рахунок наявності власної ефективності теплообмінного апарату.

Тому в якості теплоносія найбільш доцільним варіантом є звичайна очищена мережева вода. Використання мережевої води дозволить позбутися теплообмінних апаратів, і значно спростить процес забору теплоносія для використання в подальших системах.

Для циркуляції теплоносія в просторі пристрою передбачені виводи (Поз.5), спираючись на практику організації систем тепlopостачання, дані виводи концептуально розташовуються діагонально один навпроти одного, однак остаточне місце має визначатися безпосередньо з умов розташування даного пристрою, оскільки при різних системах кріплення фотоелектричних панелей на дахах, їх орієнтація може змінюватися з вертикальної на горизонтальну, а отже діагональні кути будуть також різні, окрім цього на розташування буде впливати і схема з'єднання даних пристроїв в мережу, оскільки використання одного такого пристрою є складним і недоцільним, концептуально розглядається, що дані пристрої будуть встановлюватися на

дахові сонячні електростанції, і відповідно дані пристрої також будуть об'єднуватися у загальну мережу витоків теплоносія.

Серед основних сфер застосування, даних пристроїв, можна виділити комунальні та некомунальні дахові сонячні електростанції, однак більш привабливим з точки зору раціональності використання є все ж таки комунальний сектор, такий як лікарні, адміністративні будівлі, садки та інші. Встановлення дахових сонячних електростанцій в таких галузях дуже стрімко зросло і питома потужність відновлювальної сонячної енергетики комунального сектору продовжує зростати. Разом з тим в зазначених закладах і сферах є значне використання теплої води, яка в даний час підігрівається від електричних водонагрівачів (в переважній кількості), або від власних газових котелень. Оскільки для найбільш ефективної роботи сонячних фотоелектричних панелей, температуру теплоносія не можна буде підняти до значних температур, то таку воду можна буде подавати замість мережевої у електричні водонагрівачі, що в свою чергу буде викликати економію витраченої електричної енергії, і разом з тим зменшуватиме навантаження на існуючі електричні мережі закладів. Даний аспект є також дуже важливим оскільки аудит лікарень міста Одеси показав, що стан електричних мереж є вкрай занедбаний і лише частково починає реконструюватися, в той час як державні вимоги щодо утримання хворих на стаціонарному лікуванні постійно зростають, що невпинно призводить до збільшення навантаження на мережі. В результаті виникають перевантаження існуючих мереж, що викликають додаткові втрати напруги та потужності в розподільних мережах.

Тому використання даних пристроїв в залежності від масштабів використання може комплексно покращити ситуацію в електричних мережах та зменшити споживання електричної енергії.

Разом з цим використання даної конструкції має суттєву перевагу над іншими існуючими, оскільки даний пристрій може бути виготовлений та встановлений на будь-яку існуючу фотоелектричну панель, тобто цей пристрій є модулем адаптації фотоелектричної панелі в гібридний колектор, а отже

будь-яка існуюча дахова електростанція може бути переобладнана за рахунок даного пристрою для отримання теплової енергії, що матиме суттєво менші капітальні витрати при використанні існуючих типів гібридних колекторів.

### **3.2 Зменшення світлового потоку при використанні пристрою**

Оскільки при застосуванні пристрою для підвищення ККД над самою фотоелектричною панеллю з'являються два додаткових шари, які за своїми фізичними властивостями не є абсолютно прозорими, то вони будуть викликати відповідне зменшення інсоляції на поверхню кремнієвих пластин. В дисертаційній роботі відповідно до зазначеного опису пристрою приймається, що верхній світлопрозорий шар виконується з кварцового скла, а в якості теплоносія виступає прісна вода.

Оскільки кварцове скло отримало дуже широкий спектр застосування, то сучасні технології виробництва скла досягли значних результатів в покращенні пропускної здатності скла, і середній коефіцієнт пропускання світлового потоку через скло приблизно коливається в межах 0,91-0,92, що є досить високим показником. На коефіцієнт пропускання скла впливає безпосередньо його хімічний склад та товщина, найбільш вагомий внесок в пропускній здатності серед домішок відіграють оксиди заліза. Разом з тим промисловість навчилася випускати скло, яке має марку «над прозоре» коефіцієнт пропускання такого скла за даними виробників лежить в межах 0,99 в. о, що є дуже високим показником та зовсім в незначній мірі зменшуватиме потік сонячної енергії на фотоелектричну панель.

Зовсім інакше на пропускання сонячного світла впливає вода. Вода є середовищем умовно прозорим. Оптично чиста вода приблизно в 1000 разів гірше пропускає сонячне світло в порівнянні з атмосферним повітрям. Під оптично чистою водою слід розуміти таке середовище, яке є вільним від фарбуючих речовин і механічних домішок. Послаблення світлового потоку за рахунок поглинання оптично чистою водою монохроматичного потоку, що утворює пучок паралельних променів, визначається за показовим законом

$$F_k = F_0 \cdot 10^{-kx}, \quad (3.1)$$

де  $F_k$  – світловий потік, що був пропущений шаром води;

$F_0$  – вхідний світловий потік монохроматичного спектру;

$x$  – товщина шару води, через який проходить світло, м;

$k$  – показник поглинання шару води, 1/м.

Показники поглинання, розсіювання та послаблення світла можна визначити з кривих наведених на рисунку 3.2

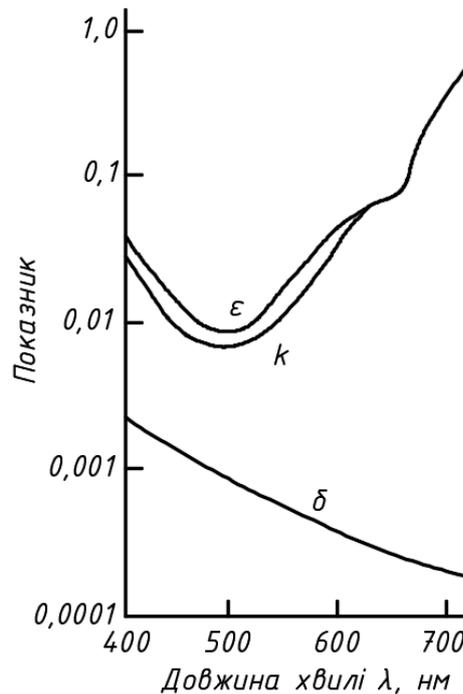


Рисунок 3.2 – Криві поглинання, розсіювання та послаблення світла в оптично прозорій воді в залежності від довжини хвилі  
 $\varepsilon$  – показник послаблення світлового потоку,  $\delta$  – показник розсіювання,  $k$  – показник поглинання

Як можна побачити з кривих при довжині хвилі приблизно в 490 нм, на яку припадає найбільша частка інтенсивності сонячного випромінювання та що дорівнює синьому кольору показник поглинання дорівнює  $k = 0,006$  1/м. На цій ділянці спектру вода дуже поглинає світловий потік. Втрати в такому випадку становлять 1,5% при шляху світла довжиною в 1 м. На ділянці спектра червоного кольору з довжиною хвилі близько 720 нм показник поглинання

досягає найбільшого значення. У цьому випадку  $k = 1/\text{м}$ , а на кордоні з ультрафіолетовим випромінюванням  $k = 0,05 \text{ 1/м}$ .

Поглинання світла водою у видимому спектрі можна розглядати як суму двох компонентів:

а) поглинання світла у воді частинками, що знаходяться в стані рівноваги;

б) поглинання світла оптично чистою водою.

Присутність у воді різноманітних частинок значно підвищує загальне поглинання світлового потоку, однак в даній роботі враховується що наявна система водо підготовки, що знано зменшує вміст частинок в воді, тому цією часткою поглинання, можна знехтувати на даному етапі.

Вся енергія, що була поглинута водою витрачається на її нагрівання, тому в загальному енергетичному балансі пристрою ця частка враховуватиметься, як складова теплової енергії.

Оскільки орієнтована товщина водяного проміжку пристрою приймається 15 мм, то з урахуванням кривих наведених на рисунку 3.2 будуються залежності поглинання світлового потоку при різних довжинах хвиль.

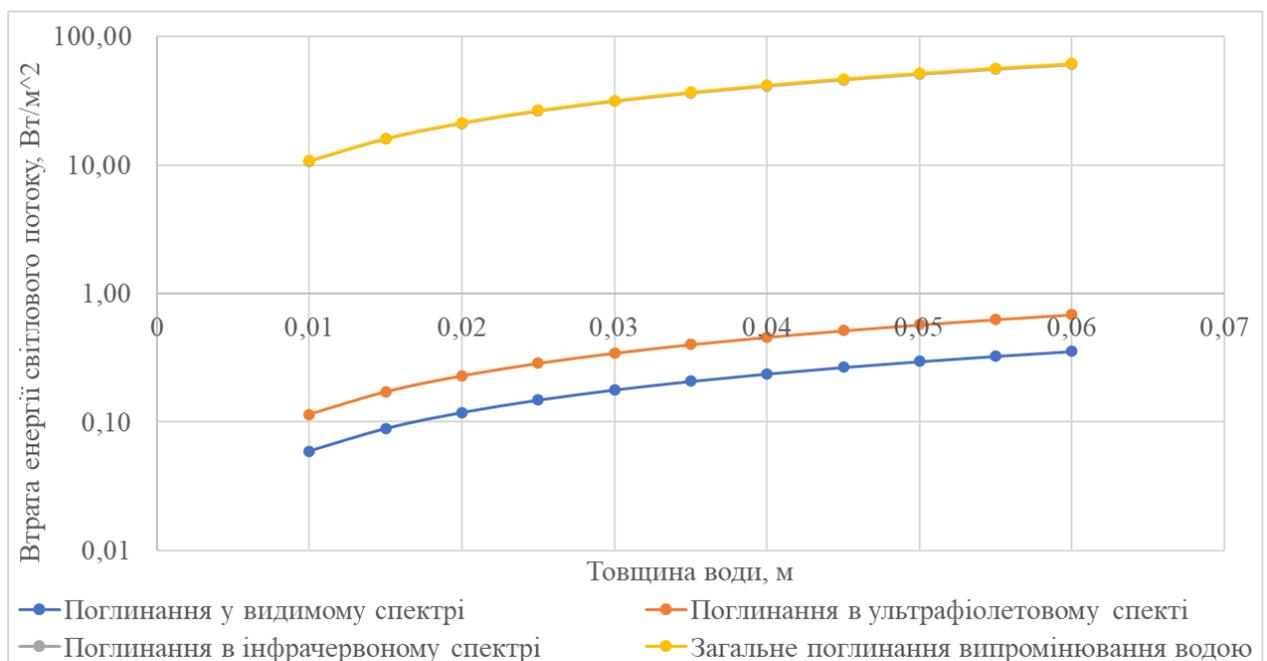


Рисунок 3.3 – Втрати енергії світлового потоку в різних спектрах

Побудова графіка представленого на рисунку 3.3 проводилась для інтенсивності сонячної інсоляції, що дорівнює  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , а спектральний розподіл енергії у відсотках розподілений як, видиме випромінювання 43%, інфрачервоне випромінювання 47% та ультрафіолетове 10 %.

Таким чином, при товщині водяного потоку в 15 мм, втрата загальної інтенсивності сонячного випромінювання складає приблизно 1,6 %, але ця частка не втрачається, вона переходить у теплову частину використання енергії пристроєм.

Розсіяння світла у воді значною мірою залежить від кількості частинок, що знаходяться у стані рівноваги, однак навіть чиста дистильована вода здатна розсіювати світло. Це явище є складним і спричиняється як наявністю механічних частинок у воді, так і рухом молекул води.

Паралельний монохроматичний пучок променів, який проходить через шар води, товщиною  $x$ , послаблюється внаслідок розсіювання, що можна описати наступним виразом

$$F_{\sigma} = F_0 \cdot 10^{-\sigma x}, \quad (3.2)$$

де  $\sigma$  – показник розсіювання світла, що залежить від кількості врівноважених частинок в одиниці об'єму води та розміру цих частинок.

Розмір частинки значною мірою змінює характер розсіювання. Якщо розмір частинки настільки малий, що її діаметр набагато менше довжини хвилі світла і вимірюється тисячними частками мікрона, то промінь світла, що впав на таку частинку, розсіюється практично у всі сторони з рівною силою. Кількість світла, що пройшло в цьому випадку вперед, дорівнюватиме кількості світла, що було відкинуте часткою назад.

При збільшенні розміру частки кількість світлової енергії, що пройшла у напрямку падаючого променя, збільшується. Якщо діаметр частки дорівнює за величиною довжині хвилі світла, то кількість світлової енергії, що пройшла в напрямку падіння променя світла, буде приблизно в 2,5 рази більше від кількості світлової енергії, відкинутої назад.

Для обчислення показника розсіювання можна скористатися формулою

$$\sigma = c\lambda^{-\nu} \quad (3.3)$$

де  $c$  – постійний коефіцієнт;

$\nu$  – показник степеню, що залежить від радіусу частинок, що розсіюють випромінювання.

Таке розсіювання світлового потоку в товщині води підпорядковується закону Релея. Однак Релеєвський закон розсіювання застосовується лише за радіусів частинок розміром до 0,05 мк. При великих значеннях радіусу часток показник ступеня починає швидко зменшуватися.

При малому радіусі частинок ослаблення відбувається сильніше у фіолетовій частині спектра, а при збільшенні розміру частинок різниця в ослабленні світла між червоною і фіолетовою частинами спектру зменшується. При діаметрі частинок понад 4 мк розсіювання не залежить від довжини хвилі.

Розсіювання світла в чистій, оптично прозорій воді називається молекулярним розсіюванням. Безперервне переміщення молекул, викликане тепловими коливаннями у водному середовищі, створює різну елементарну густину води. Показники заломлення в сусідніх елементарних обсягах води можуть виявитися в якусь мить різними, виникає оптична неоднорідність середовища, і промінь світла відхиляється від свого шляху.

### **3.3 Моделювання роботи фотоелектричної панелі**

Одним із найбільш важливих процесів, що відбувається в фотоелектричних панелях, є процес генерації електричної енергії під впливом сонячного випромінювання. Визначення рівня та ефективності цієї генерації дає змогу оцінити кількісні та якісні показники роботи панелі у будь-яких режимах.

В якості об'єкта моделювання генерації фотоелектричної енергії фотоелектричними панелями була взята кремнієвий сонячний елемент з розмірами 10x10 мм. Для моделювання використовувалися реалістичні дані сонячного випромінювання, які були отримані з результатів 2-го розділу В даній моделі враховувалося положення сонця від місяця та дати, що дало змогу

зробити приблизну оцінку властивостей сонячного випромінювання за умов ясного неба. Окрім характеристик сонячного випромінювання, в даній моделі враховується вплив структури, положення, температурних характеристик елементу та паразитних опорів, що впливають на результуючі  $I-V$  та  $P-V$  характеристики.

Для моделювання було вибрано одновимірну модель кремнієвого  $p-n$  переходу з генерацією носіїв і рекомбінацією Шоклі-Ріда-Хола. Заземлений анодний контакт моделюється як тонкий ідеальний омичний контакт нанесений на емітер (область  $n$  легування), і таким же чином моделюється контакт нанесений на сторону основи (область  $p$  легування). При моделюванні приймалося, що  $n$  легування має щільність  $5 \cdot 10^{15} \text{ 1/cm}^3$ , а  $p$  легування  $1 \cdot 10^{19} \text{ 1/cm}^3$ . Область  $p$  легування з'єднана з зовнішнім ланцюгом, що опір послідовного кола та паразитний опір  $R_{series}$  та  $R_{shunt}$  відповідно. Схема заміщення фотоелектричної комірки наведено на рисунку 3.4.

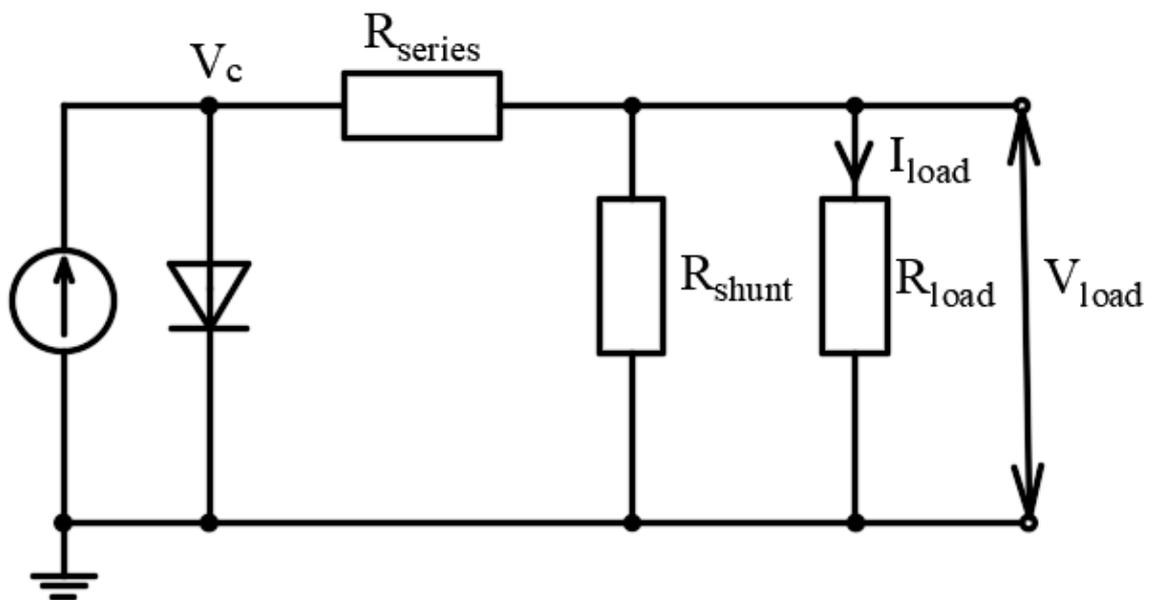


Рисунок 3.4 – Схема заміщення фотоелектричної комірки

Виходячи з даної схеми заміщення катодна напруга може бути визначена як

$$V_c = IR_{eq}, \quad (3.4)$$

Еквівалентний опір даної схеми може бути визначений як

$$R_{eq} = \left( \frac{1}{R_{load}} + \frac{1}{R_{shunt}} \right)^{-1} + R_{series}, \quad (3.5)$$

В моделі також допускається припущення, що сторона емітера має ідеальне антивідблискуюче покриття, тобто коефіцієнт відбиття  $R(\lambda) = 1$ . На швидкість генерації впливає положення сонця та спектральне випромінювання, що описується рівнянням

$$G_{(z)} = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda)(1 - R(\lambda))\phi(\lambda)\exp(-i\alpha(\lambda)z) d\lambda, \quad (3.6)$$

де  $\alpha(\lambda)$  – коефіцієнт абсорбції, який може бути визначений як

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad (3.7)$$

де  $k(\lambda)$  – уявна частина показника заломлення.

Швидкість генерації фотона може бути визначена за виразом

$$\phi(\lambda) = \frac{\lambda}{hc} F(\lambda) \quad (3.8)$$

де  $F(\lambda)$  – спектральна опроміненість.

$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( \exp\left( \frac{hc}{k_B \lambda T_{sun}} \right) - 1 \right)} \quad (3.9)$$

Поглинання світла моделюється в фотоелектричному елементі за допомогою довідникових показників заломлення для кремнію як функції довжини хвилі падаючого світла та температури комірки. Вихідна характеристика комірки пропорційна густині потужності падаючого сонячного випромінювання. Тому в даній моделі вирішується одновимірною задачею лише один раз для сонячної постійної  $1353 \text{ Вт/м}^2$ , а оптимальні значення струму і потужності множаться на коефіцієнт, який враховує

відношення опромінення в даний момент до сонячної постійної шляхом врахування орієнтації комірки, положення сонця та часу.

Отримання  $I-V$  та  $P-V$  характеристик відбувається шляхом вирішення рівнянь зі зміною величини опору навантаження від дуже великих (умови короткого замикання) до великих значень (умови розімкнутого ланцюга). Відповідно до цих характеристик можна визначити струм короткого замикання, напругу холостого ходу та точку найбільшої потужності.

Ефективність роботи фотоелектричної панелі визначається як відношення енергії падаючої радіації до енергії яка була перетворена фотоелектричною коміркою, і визначається за виразом

$$\eta = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \quad (3.10)$$

де  $I_{sc}$  – струм короткого замикання фотоелектричної комірки;

$V_{oc}$  – Напруга холостого ходу комірки;

$FF$  – фактор заповнення;

$P_{in}$  – вхідна потужність.

Таким чином проводиться моделювання роботи сонячної комірки для 1 липня

Фактор заповнення визначається як

$$FF = \frac{I_{mp}V_{mp}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (3.11)$$

Вхідна потужність визначається наступним виразом

$$P_{in} = H_0A \quad (3.12)$$

де  $A$  – площа комірки, що опромінюється.

Додатково при моделюванні враховувались такі параметри

Таблиця 3.1 – Додаткові параметри моделі

Назва параметру	Значення
Послідовний опір	0 Ом
Площа поверхні клітини що піддається опроміненню	$1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$
Товщина моделювання	$1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$
Шунтуючий опір	$1 \cdot 10^{12} \text{ Ом}$
Пікове емітерне легування <i>p</i> -типу	$1 \cdot 10^{25} \text{ 1/м}^3$
Температура клітини	300 К
Азимут комірки в градусах	0°
Рівномірне базове легування <i>n</i> -типу	$5 \cdot 10^{21} \text{ 1/м}^3$
Висота розташування панелі	40 см
Кут нахилу комірки в градусах	15°

Моделювання проводилося для 1 липня, в розрахунках були прийняті такі дані щодо положення сонця та інтенсивності сонячної радіації, що представлені на рисунках 3.5, 3.6.

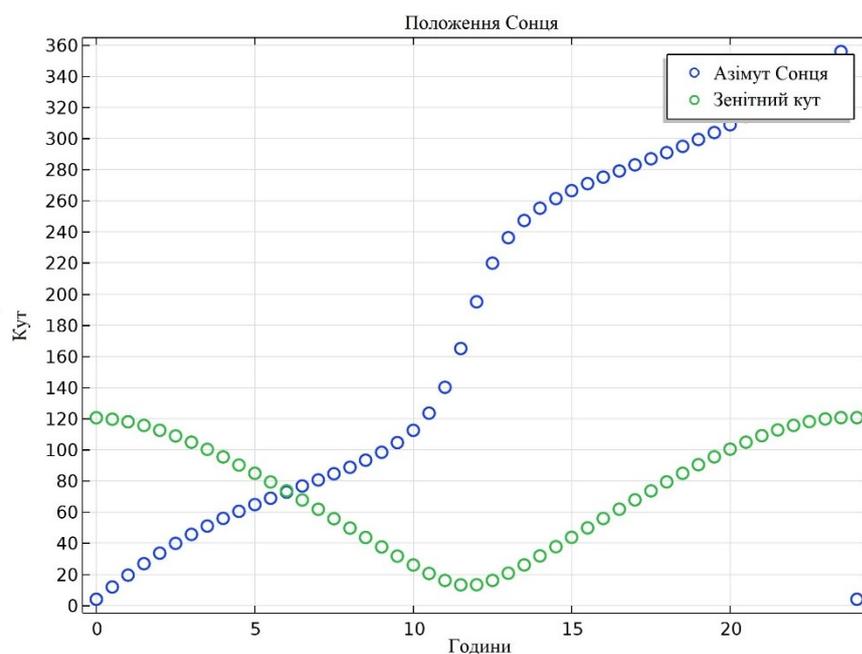


Рисунок 3.5 – Зміна зенітного кута та азимуту Сонця протягом доби

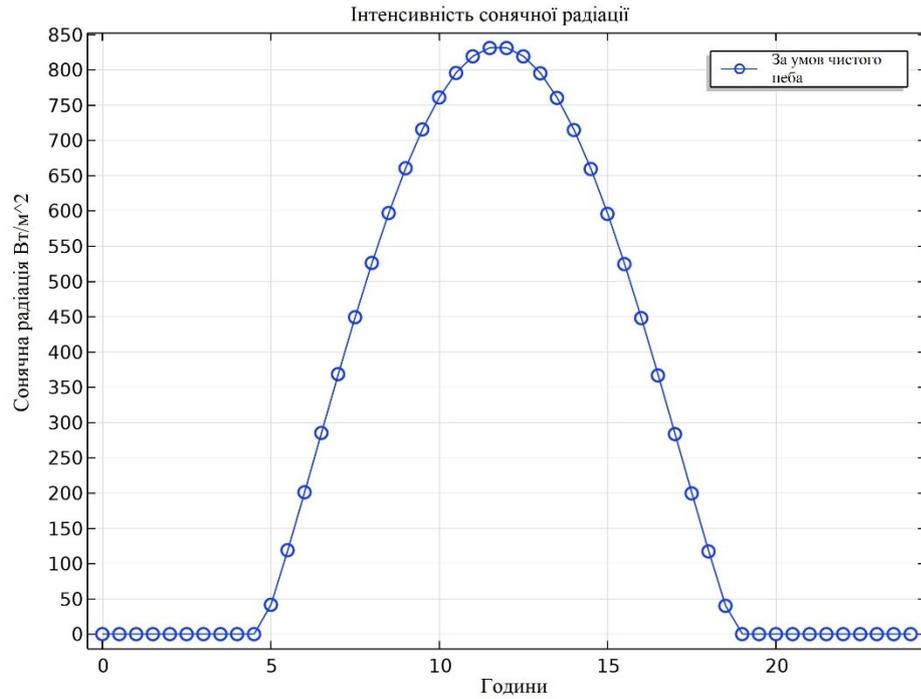


Рисунок 3.6 – Задана інтенсивність сонячної радіації протягом доби

За рахунок зміни положення Сонця протягом доби було також визначено кут падіння променів на поверхню протягом обраної доби, графік зміни кута падіння представлений на рисунку 3.7

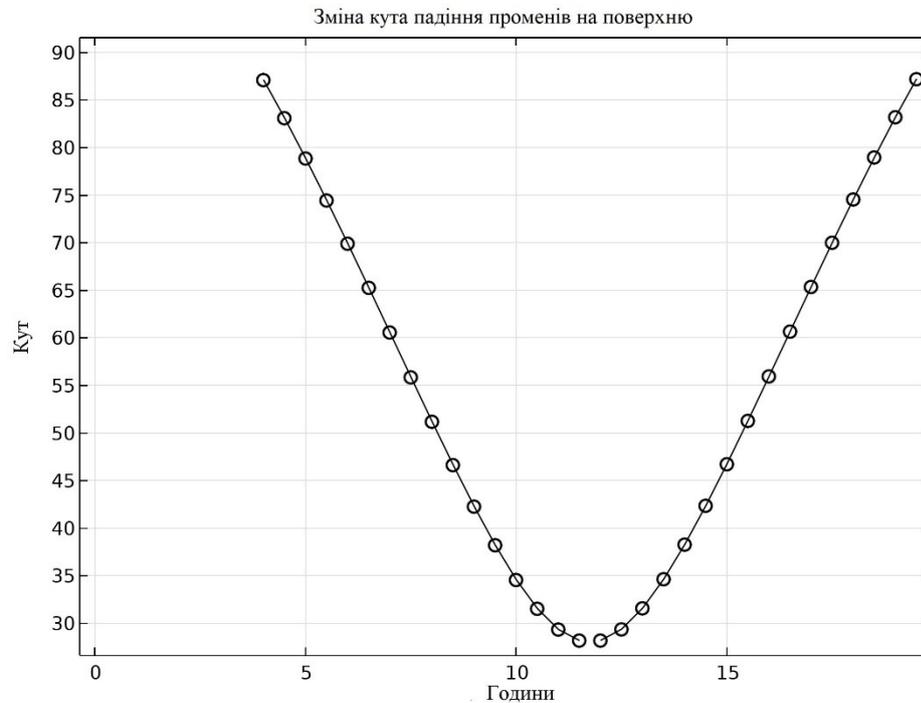


Рисунок 3.7 – Зміна кута падіння променів на поверхню фотоелектричної комірки

З урахуванням всіх зазначених параметрів були отримані такі вихідні характеристики модельованого елемента які представлені на рисунках 3.7, 3.8.

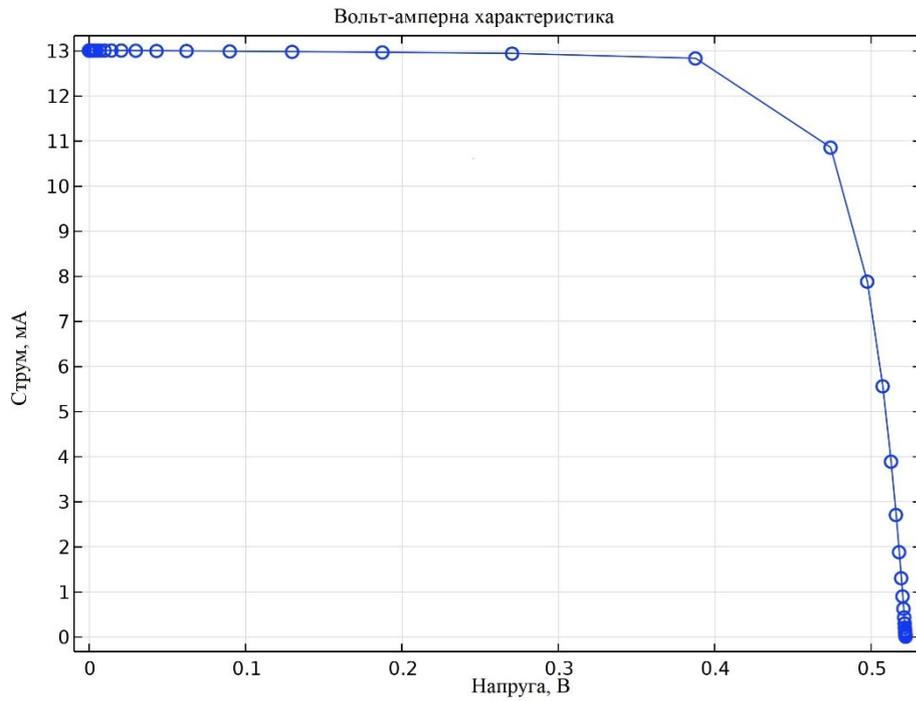


Рисунок 3.7 – Вольт-амперна характеристика модельованого елемента

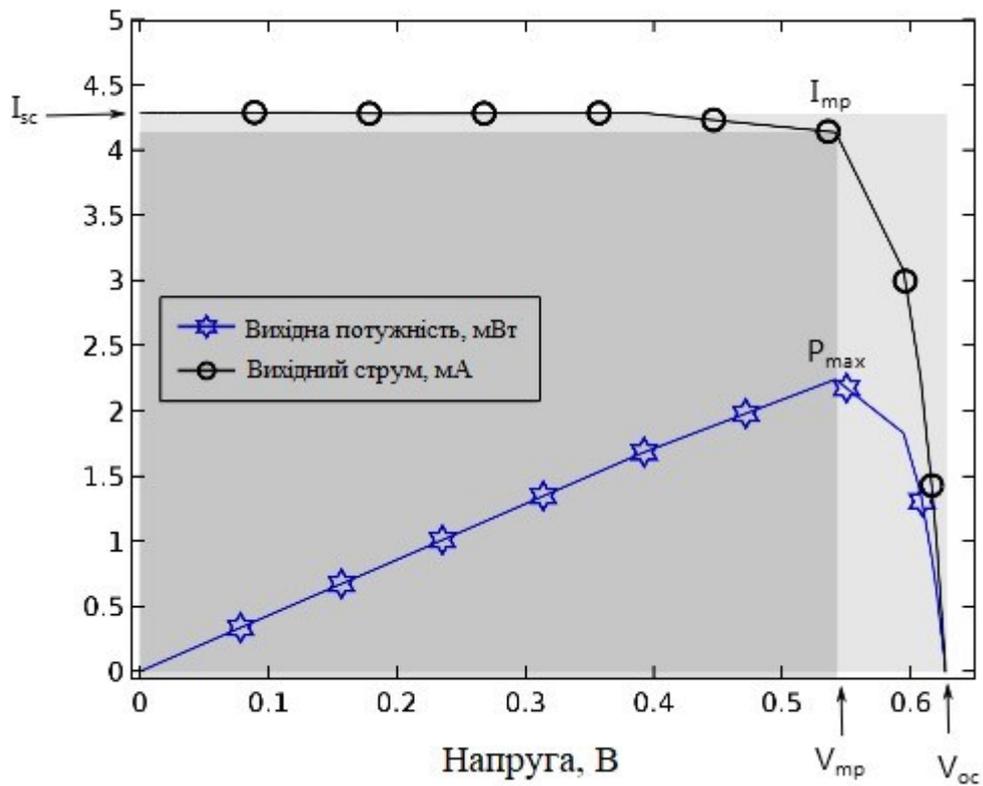


Рисунок 3.8 – PV та IV характеристики комірки в одній системі координат

При моделюванні враховувалось що температура комірки дорівнює 300 К, що приблизно відповідає стандарту випробування STC.

Однак оскільки при роботі фотоелектричних панелей, вони піддаються перегріванню, то було промодельована зміна максимальної потужності комірки, при різних рівнях інтенсивності сонячної радіації та різних температурах комірки, результати зміни максимальної потужності представлені на рисунку 3.9

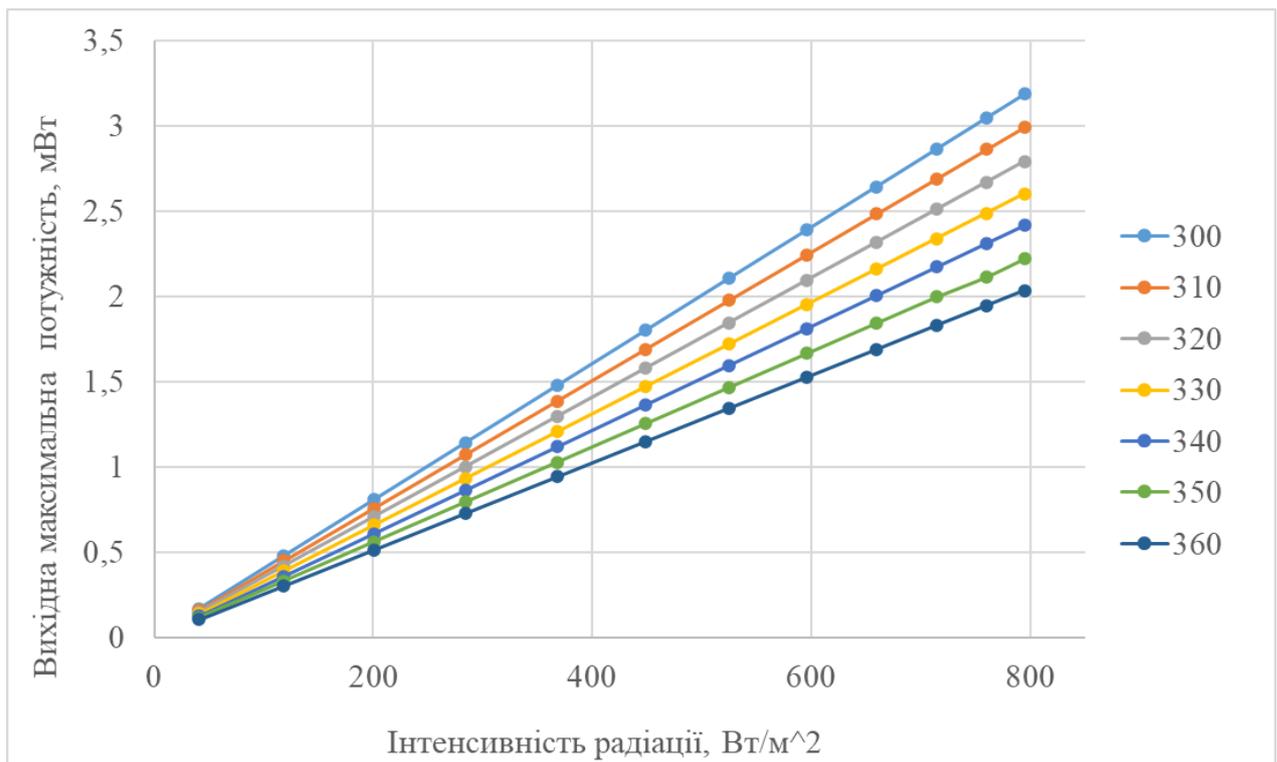


Рисунок 3.9 – Зміна вихідної максимальної потужності в залежності від інтенсивності радіації та температури комірки

Виходячи з даних залежностей видно, що найбільші втрати максимальної потужності спостерігаються при більших рівнях інтенсивності сонячної радіації, тобто в час найбільш активної роботи фотоелектричних панелей, а різниця в рівнях максимальної потужності при інтенсивності 800 Вт/м², для температури 300 К та 360 К склала понад 30 %, при цьому температурний коефіцієнт даної моделі склав приблизно 0,55%/К, що є дуже близьким значенням до існуючих панелей, однак є трохи завищеним

показником для сучасних монокристалічних фотоелектричних панелей, які випускаються в останні роки.

### 3.4 Моделювання теплових процесів роботи фотоелектричної панелі з пристроєм

Робочу температуру пристрою в загальному випадку можна розрахувати з рівняння теплового балансу енергії

$$Q_h = P + Q_c + Q_r, \text{ Вт}, \quad (3.13)$$

де  $Q_h$  – кількість сонячної енергії, що надійшла на поверхню від сонця, Вт;

$P$  – кількість енергії, яка була перетворена сонячною панеллю в електричну енергію, Вт;

$Q_c$  – кількість енергії, яка втрачається на конвекцію поверхні з зовнішнім середовищем, Вт;

$Q_r$  – кількість енергії, що втрачається на випромінювання поверхні, Вт.

Кількість енергії, що потрапляє на сонячну поверхню, можна визначити з рівняння

$$Q_h = (1 - \rho_{panel}) Q_t S_{panel}, \text{ Вт}, \quad (3.14)$$

де  $\rho_{panel}$  – коефіцієнт відбиття випромінювання панеллю, в. о;

$Q_t$  – нормальний до панелі потік сонячної енергії, Вт/м<sup>2</sup>;

$S_{panel}$  – загальна площа панелі, м<sup>2</sup>.

Втрати енергії сонячної панелі за рахунок конвекції можна визначити як

$$Q_{conv} = \alpha_{conv} (\tau - \tau_{air}) S_{panel}, \text{ Вт}, \quad (3.15)$$

$\alpha_{conv}$  – коефіцієнт конвективної передачі тепла, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\tau$  – температура сонячного модуля, К;

$\tau_{air}$  – температура повітря, що оточує сонячну панель, К.

Втрати тепла випромінюванням можна визначити за рівнянням

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma(\tau^4 - \tau_{air}^4)S_{panel}, \text{ Вт}, \quad (3.16)$$

де  $\varepsilon$  – константа випромінювання панелі, приймається  $\varepsilon = 0,7$ ;

$\sigma$  – константа Стефана-Больцмана,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

При розрахунку теплового балансу сонячної панелі необхідно враховувати властивість сонячних панелей зменшувати генерацію електричної енергії при збільшенні температури панелі. Дана властивість регламентується для кожної сонячної панелі температурним коефіцієнтом, який зазначається заводом виробником. З урахування температурного коефіцієнта кількість енергії, що перетворюється в електричну енергію з рівняння (12) отримає наступний вигляд.

$$P = P_{25}(1 - \beta_{panel}\Delta\tau), \text{ Вт}, \quad (3.17)$$

де  $P_{25}$  – потужність сонячної панелі, яка визначається для  $25^\circ\text{C}$ ;

$\beta_{panel}$  – температурний коефіцієнт сонячної панелі,  $^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$\Delta\tau$  – різниця температур між реальною в конкретний період часу та нормативною для якої приводяться параметри панелі ( $25^\circ\text{C}$ ).

З урахуванням усіх складових рівняння теплового балансу в загальному випадку для сонячної панелі можна записати у наступному вигляді

$$(1 - \rho_{panel})Q_t = [P_{25}(1 - \beta_{panel}\Delta\tau)] + \alpha_{conv}(\tau - \tau_{air}) + \varepsilon\sigma(\tau^4 - \tau_{air}^4), \text{ Вт}. \quad (3.18)$$

Вирішуючи дане рівняння з урахуванням зміни інтенсивності падаючої радіації на поверхню протягом доби та зміни температури зовнішнього повітря можна отримати температуру сонячної поверхні протягом доби.

Для врахування втрат енергії від конвекції розглядається модель примусової конвекції (обдув), оскільки сонячні панелі розташовуються на відкритому просторі де майже завжди спостерігається рух повітря усереднені значення швидкості вітру по місяцях наведені на рисунку 3.10. Також оскільки сонячні панелі розташовуються на відкритому повітрі, і момент для якого проводиться розрахунок припадає на світлу частину доби, коли панель опромінюється то приймається умова, що  $t_{panel} > t_{air}$ .

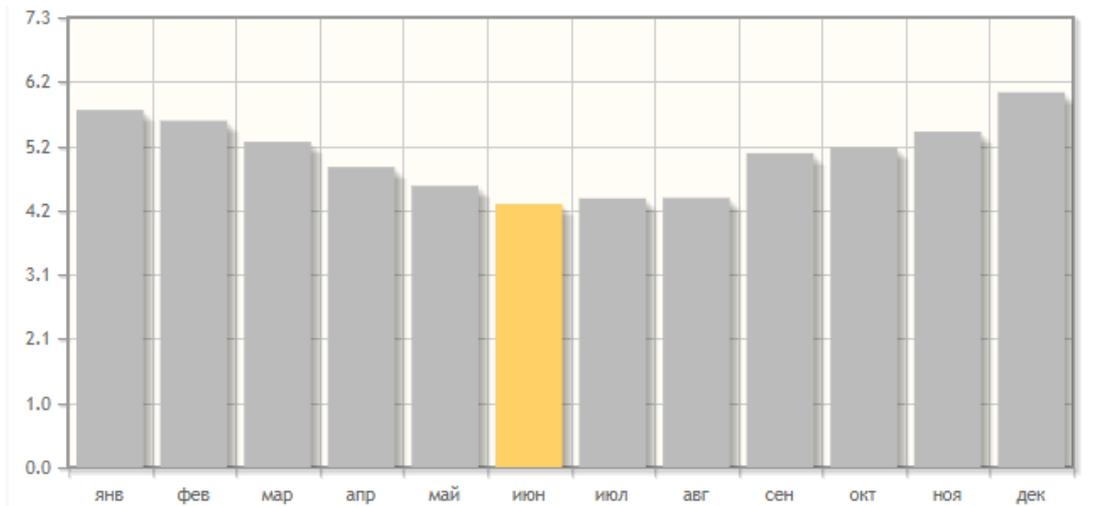


Рисунок 3.10 – Усереднені значення швидкості вітру в м. Одеса

Тоді з урахування всіх прийнятих тверджень, коефіцієнт конвективної теплопередачі можна визначити як

$$\alpha_{conv} = \frac{Nu \lambda_{air}}{l_0}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad (3.19)$$

де  $Nu$  – число Нуссельта при результуючій температурі, в. о;

$\lambda_{air}$  – коефіцієнт теплопровідності повітря при результуючій температурі, Вт/(м·К);

$l_0$  – результуючий розмір поверхні вздовж якого відбувається конвективний перенос теплоти, може змінюватися в залежності від напрямку вітру, м.

Число Нуссельта може визначатися для декількох випадків

якщо  $Re \leq 5 \cdot 10^5$

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, \quad (3.20)$$

якщо  $Re \leq 3 \cdot 10^7$

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (3.21)$$

де  $Re$  – число Рейнольдса;

$Pr$  – число Прантдля.

$$Re = \frac{V_{wind} l_0}{\nu_{cin}}, \quad (3.22)$$

де  $V_{wind}$  – швидкість повітря вздовж поверхні панелі, м/с;

$\nu_{cin}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, м<sup>2</sup>/с.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda_{air}} \quad (3.23)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, Па·с;

$C_p$  – питома ізобарна теплоємність повітря при результуючій температурі, Дж/(кг·К).

$$\mu = \frac{7,06064681472347 \cdot 10^{-9} - 2,17418543389576 \cdot 10^{-5} \cdot t_0^2 + \dots}{1000000} \dots \quad (3.24)$$

$$\dots \frac{+0,0482101987326381 \cdot t_0 + 17,1625054185128}{1}, \text{ Па} \cdot \text{с},$$

де  $t_0$  – результуюча температура, °С.

$$C_p = 1,81359472734094 \cdot 10^{-10} \cdot t_0^4 - 5,87507811990248 \cdot 10^{-7} \cdot t_0^3 + \dots \quad (3.25)$$

$$\dots + 0,000578428942965047 \cdot t_0^2 + 0,00743322055343565 \cdot t_0 + \dots$$

$$\dots + 1005,64463836247, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$$\lambda_{air} = \frac{9,34273884650736 \cdot 10^{-10} \cdot t_0^3 - 2,53697754410552 \cdot 10^{-6} \cdot t_0^2 + \dots}{100} \dots \quad (3.26)$$

$$\frac{+0,00732841363832881 \cdot t_0 + 2,41822263249161}{1}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

$$\nu_{cin} = \frac{\mu}{\rho}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad (3.27)$$

де  $\rho$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>.

$$\rho = \frac{353,0885}{t_0 + 237,15}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (3.28)$$

Таким чином для усереднених метеорологічних даних для місяця липня, температура фотоелектричної панелі в залежності від рівня сонячної інсоляції має наступний вигляд

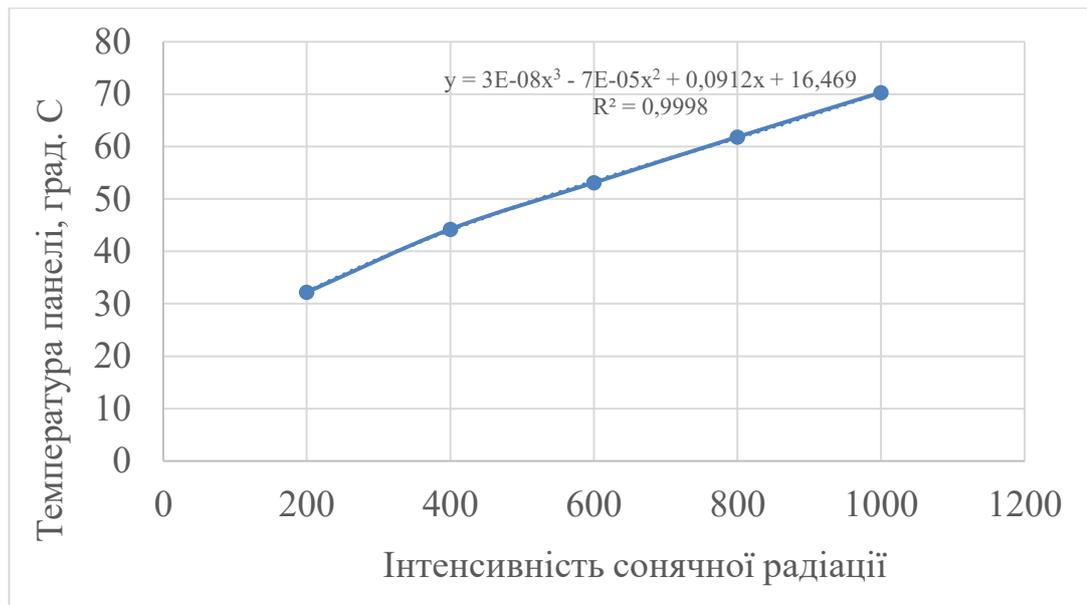


Рисунок 3.11 – Залежність температури фотоелектричної панелі від рівня сонячної інсоляції для метеорологічних даних липня

Як можна побачити з діаграми, що навіть при низьких рівнях інтенсивності сонячної радіації температура фотоелектричної панелі, більша за нормовану, а отже відбувається скорочення рівня електричної генерації. Для доби, інтенсивність сонячної радіації, якої зазначена на рисунку 3.6 та з урахуванням отриманих характеристик змін вихідної потужності від перегрівання фотоелектричної панелі, втрати протягом однієї доби, для 1 м<sup>2</sup> площі зображені на рисунку 3.12.

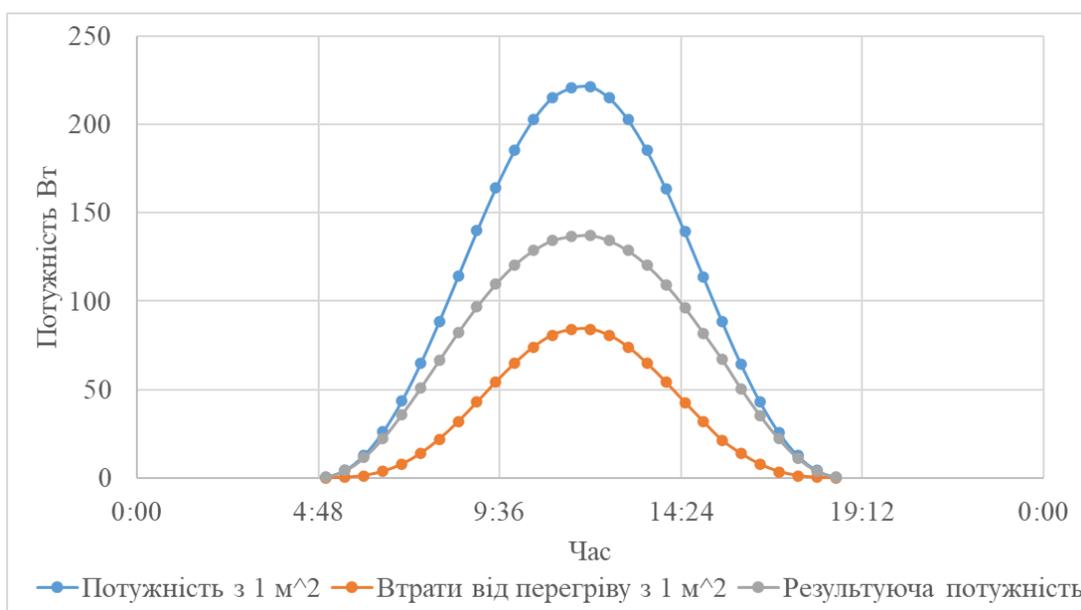


Рисунок 3.12 – Потужність фотоелектричної панелі, втрати від перегріву та результуюча потужність протягом доби з 1 м<sup>2</sup>

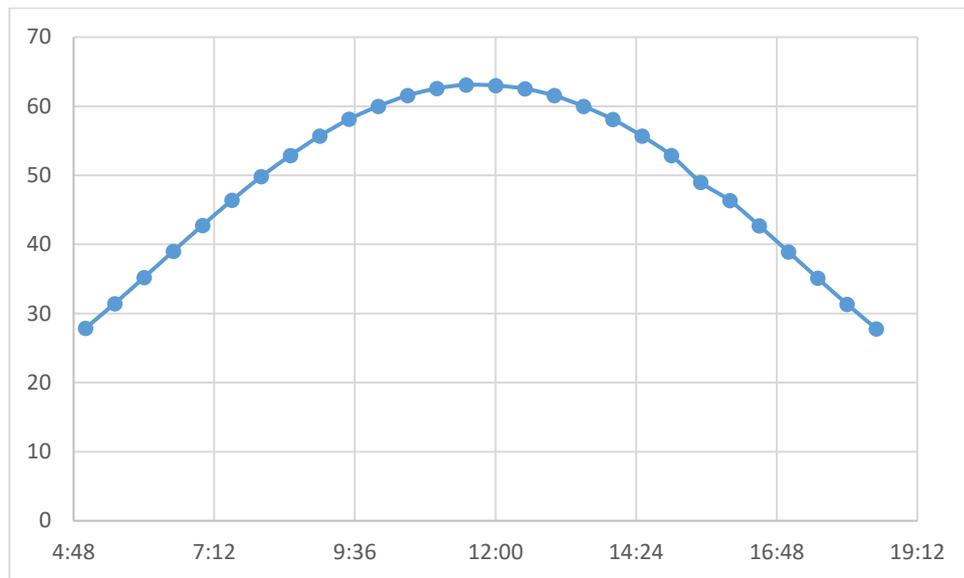


Рисунок 3.14 – Температура фотоелектричної панелі протягом доби для якої розраховувались втрати потужності

Для перевірки адекватності роботи моделі визначення температури фотоелектричної панелі, було проведено серію експериментів з вимірювання температури дослідних фотоелектричних панелей виробництва Schneider Electric, зовнішній вигляд якої представлений на рисунку 3.15.



Рисунок 3.15 – Зовнішній вигляд дослідної фотоелектричної панелі

Для вимірювання температури фотоелектричної панелі використовувався лазерний пірометр. В ході експерименту було використано дві представлені панелі, які знаходилися в однакових умовах, експеримент

проводився 4 вересня, в результаті вимірювання температури було отримано такі температурні показники панелі.

+ 46,4°C	+ 47,3°C
+ 47,9°C	+ 51,6°C
+ 51,4°C	+ 51,7°C
+ 50,9°C	+ 52,8°C
+ 45,2°C	+ 50°C

+ 51,1°C	+ 50,9°C
+ 51,8°C	+ 52°C
+ 53,8°C	+ 50,3°C
+ 52,6°C	+ 50,7°C
+ 50,9°C	+ 43,7°C

Рисунок 3.16 – Експериментальні дані вимірювання температури 4 вересня

Для визначеного часу експерименту відповідно до представленої моделі було визначено температуру фотоелектричної панелі, яка склала 52,2 °С. Дана температура є дуже близькою до виміряних значень, однак з рисунку 3.16 видно, що температура кожної комірки відрізняється один від одного, що можна обґрунтувати неоднорідністю кремнію, оскільки дослідна панель є полікристалічного типу. Таким чином представлена модель є адекватною для вирішення задач з визначення температури фотоелектричної панелі за усередненими значеннями метеорологічних даних.

Таким чином перегрівання фотоелектричних панелей над нормованою температурою у 25 °С, є поширеним явищем, яке притаманне майже всьому періоду активної роботи фотоелектричних панелей з квітня по жовтень. В свою чергу перегрів викликає значні втрати генерації електричної енергії, і як наслідок призводить до зниження ККД. При зменшенні робочої температури за рахунок використання пропонованого пристрою, можливо досягти підвищення електричного ККД.

### **3.5 Моделювання теплових процесів роботи фотоелектричної панелі з урахуванням встановлення пристрою**

Як зазначалося в розділі 3.2 вода, яка складає основну товщину пристрою для підвищення ККД фотоелектричної панелі, є при невеликих товщинах майже абсолютно світло провідним матеріалом, а отже процес її нагрівання може відбуватися лише за рахунок тієї енергії, що була втрачена при проходженні крізь товщу води, що складає зовсім малу частку. Схожа ситуація спостерігається і зі склом, оскільки в даному пристрої використовується скло з великим показником пропускання світла. Тому незважаючи на встановлення ще двох додаткових шарів над поверхнею фотоелектричного модуля, основним елементом, що буде нагріватися в даній конструкції залишаться кремнієві фотоелектричні елементи.

В загальному випадку теплові процеси, які будуть відбуватися в фотоелектричній панелі з пристроєм будуть виглядати наступним чином: сонячні промені проходячи крізь два скла та товщу води будуть потрапляти на кремнієві фотоелектричні комірки, які будуть перетворювати частину отриманої енергії в електричну, а частина енергії, яка не була перетворена в електричну буде перетворена на теплову енергію.

За рахунок встановлення пристрою частина цієї теплової енергії буде передаватися до води, яка буде постійно циркулювати тим самим підтримуючи приблизно однакову температуру теплоносія, що забезпечить усталений тепловий потік до нього. Частково тепла енергія буде втрачатися у оточуюче середовище за рахунок конвективного та радіаційного теплообміну.

З метою перевірки достатнього рівня теплового потоку від кремнієвих комірок то води, проводиться моделювання даної конструкції. Конструкція моделюється в спрощеному вигляді з використанням основних шарів. Так в якості основи для фотоелектричних панелей використовується шар товщиною 4 мм виконаний з етилен вініл ацетату (EVA), на який вкладається фотоелектричні комірки з кремнію, товщина даних комірок приймалась 1 мм,

над кремнієвими пластинами розташовується шар загартованого скла, яке встановлюється на заводі виробнику фотоелектричних панелей, після чого йде шар теплоносія у вигляді очищеної води і ззовні встановлюється ще одне скло. В моделі розрахунковій моделі параметри заводського скла фотоелектричної панелі та скла, яке встановлюється разом з пристроєм однакові. Основні характеристики матеріалів, які використовувались в моделі наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні термічні характеристики матеріалів моделі

Параметр	Величина
Скло	
Щільність	4,11 г/см <sup>3</sup>
Теплопровідність	0,711 Вт/(м·К)
Теплоємність при постійній щільності	838 Дж/(кг·К)
Коефіцієнт температурного розширення	114·10 <sup>-7</sup> 1/К
Кремній	
Щільність	2329 кг/м <sup>3</sup>
Теплопровідність	131 Вт/(м·К)
Теплоємність при постійній щільності	700 Дж/(кг·К)
Шар підкладки	
Щільність	932 кг/м <sup>3</sup>
Теплопровідність	0,35 Вт/(м·К)
Теплоємність при постійній щільності	2720 Дж/(кг·К)
Теплоносій (вода)	
Динамічна в'язкість	1,002 мПа·с
Щільність	997 кг/м <sup>3</sup>
Теплопровідність	0,603 Вт/(м·К)
Теплоємність при постійній щільності	4200 Дж/(кг·К)

Також додатково враховувались параметри металевого каркасу, який виконаний з алюмінієвого профілю, однак питома площа даного профілю через яку відбувається перенос теплоти в оточуюче середовище незначна тому значного впливу на розподіл температури всередині пристрою не спостерігається.

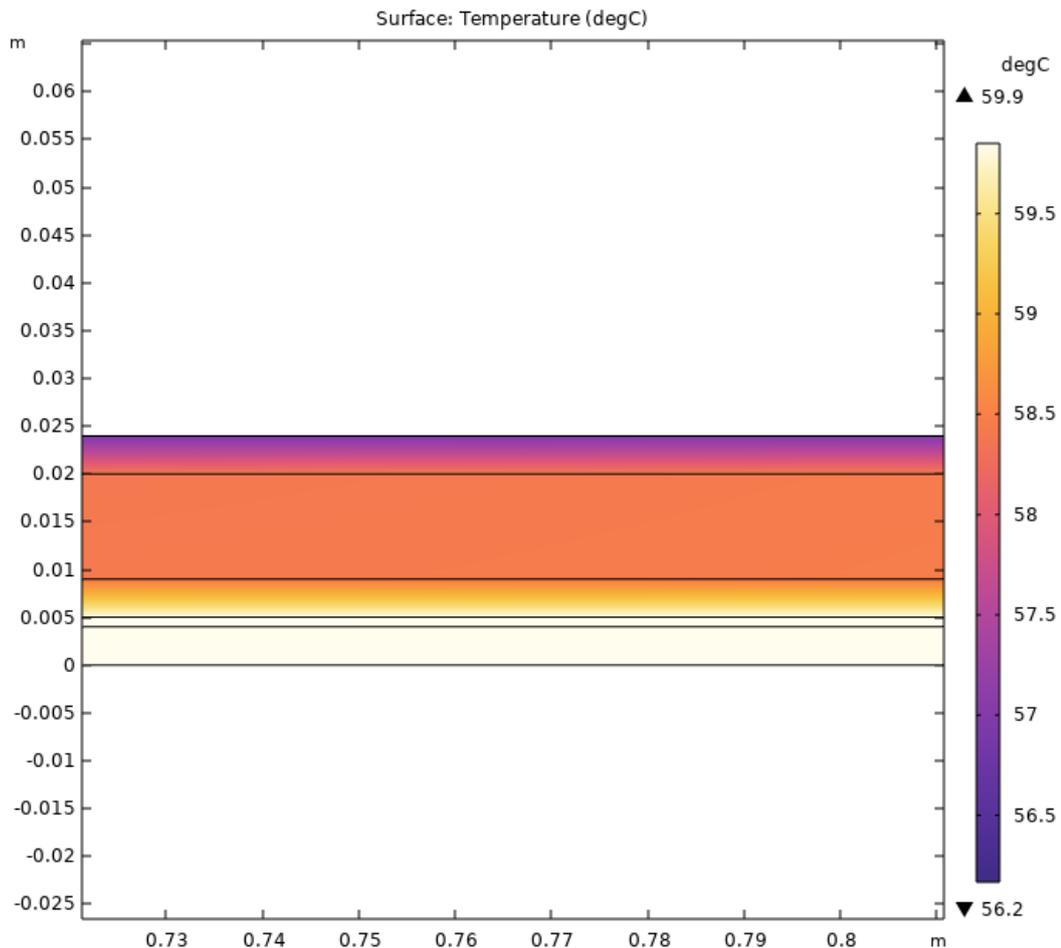


Рисунок 3.16 – Модель стаціонарного режиму фотоелектричної панелі з пристроєм для підвищення ККД

З рисунка 3.16 видно, що задня стінка фотоелектричної панелі (підкладка) має приблизно однакову температуру з кремнієвими комірками, і відповідно в такому режимі роботи перенос теплової енергії від цієї поверхні до оточуючого середовища буде значний та викликати відтік теплової енергії, але з урахуванням навіть такого відтоку, середня температура теплоносія в стаціонарному режимі дорівнює приблизно  $58\text{ }^{\circ}\text{C}$  при температурі кремнієвих комірок  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Виходячи з цього можна зробити висновок, що за рахунок даного пристрою можливо ефективно відводити теплову енергію від

кремнієвих комірок, при температурах, які приблизно дорівнюють робочим температурам панелей.

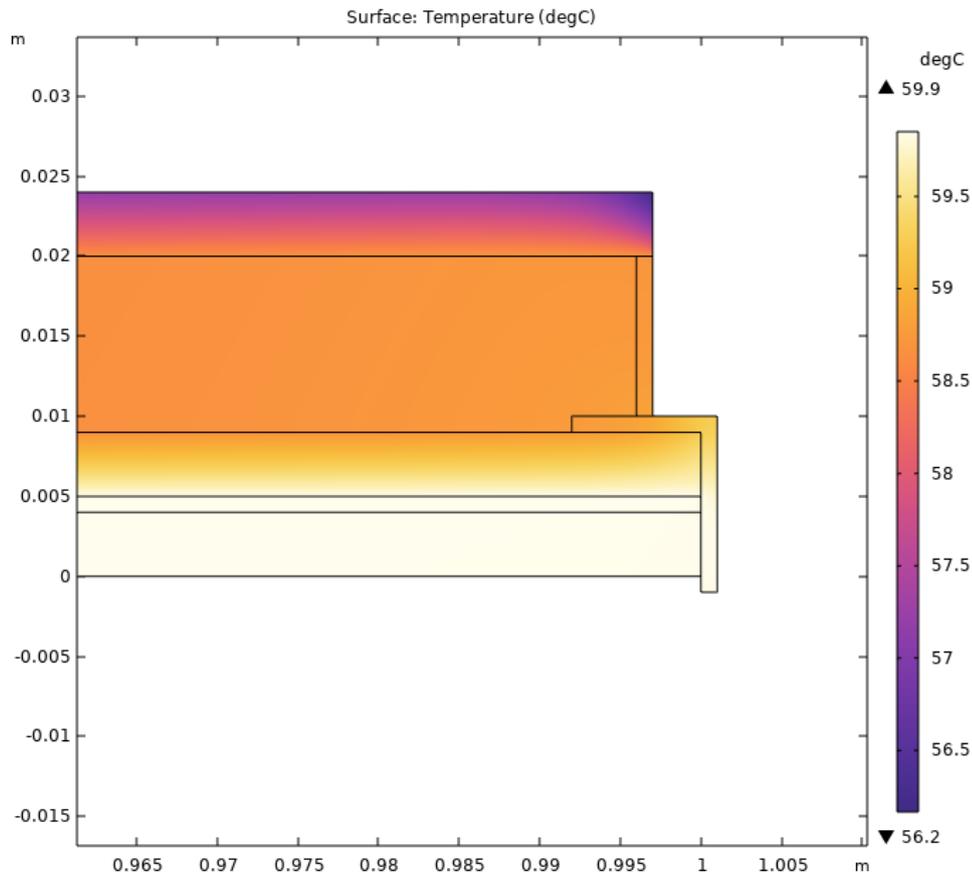


Рисунок 3.17 – Крайові зони фотоелектричної панелі з пристроєм для підвищення ККД

В крайових зонах температура теплоносія дещо нижча за температуру в середині пристрою за рахунок додаткового переносу теплової енергії від торцевих частин пристрою та панелі до оточуючого середовища, але різниця складає не більше ніж  $2^{\circ}\text{C}$ .

### 3.6 Проведення експерименту

Для проведення експерименту було створено дослідний зразок фотоелектричної панелі з пристроєм для підвищення ККД. Дослідний зразок було створено на базі полікристалічної фотоелектричної панелі представленої на рисунку 3.15. В якості світлопрозорої частин пристрою було взяте звичайне кварцове скло товщиною 2 мм. Дистанційний профіль був обраний товщиною 15 мм, що при габаритних розмірах пристрою у  $140 \times 150$  мм утворило простір об'ємом  $315 \text{ см}^3$ .

Для порівняння вихідних характеристик використовувалась ще одна полікристалічна панель, ідентична тій на яку було встановлено пристрій, при проведенні експерименту було прийняте спрощення, що характеристики обох панелей ідентичні (дане спрощення було прийняте на основі попередніх вимірів, які показали що різниця у вихідних характеристиках панелей не перевищує похибку вимірювальних приладів).

Обидві фотоелектричні панелі встановлювались поряд в одному місці, під однаковим кутом нахилу та з однаковою орієнтацією, щоб максимально мінімізувати дані впливові фактори на проведення дослідю.

Дослідні фотоелектричні панелі відповідно до характеристик наданих виробником мають номінальну потужність 2,5 Вт, номінальну напругу 5 В та номінальний струм 0,5 А. В якості навантаження до виводів обох фотоелектричних панелей було приєднано однакові резистори, з номінальним опором 10 Ом та потужністю 3 Вт.

Першим етапом проведення дослідю було визначення рівня поглинання пристроєм сонячного випромінювання, для цього для двох панелей проводились заміри вихідної напруги при різних рівнях інтенсивності сонячної радіації для погоди зі змінною хмарністю. Даний дослід показав що у реальних умовах за рахунок великої теплової інерційності фотоелектричної панелі з пристроєм вихідна потужність даної панелі була завжди більша за таку ж без пристрою, і лише при великій хмарності, коли напруга на виводах панелі коливалась в межах 1,75 В – 1,85 В, фотоелектрична панель з пристроєм видавала меншу напругу приблизно на 0,1-0,15 В. В даному досліді циркуляція теплоносія не відбувалась.

Термограма двох фотоелектричних панелей представлена на рисунку 3.18.



Рисунок 3.18 – Термограма дослід з визначення впливу поглинання пристроєм сонячного випромінювання

На термограмі можна побачити, що температура фотоелектричної панелі без пристрою підвищення ККД складає 48,5 °С, в той час як температура панелі з пристроєм складає 39,3 °С, час від початку дослід до моменту термографії 15 хвилин при змінній хмарності.

На другому етапі дослід, до пристрою було приєднано циркуляційний насос з номінальною напругою живлення від 2,5 до 6 В, що відповідно забезпечує витрату води від 80 до 120 л/год. Для можливості регулювання напруги циркуляційний насос приєднувався до джерела живлення через DC-DC перетворювач. Крізь пристрій прокачувалась звичайна мережева вода температурою 20-23 °С.

Перед початком дослід, обидві панелі було розташовані на відкрите місце, панель з пристроєм попередньо не заповнювалась теплоносієм для перевірки попередніх вихідних характеристик. Загальний вигляд панелей до початку дослід представлений на рисунку 3.19.



Рисунок 3.19 – Фотоелектричні панелі перед початком дослідю

Вихідна напруга для панелі з пристроєм склала 4,62 В для панелі без пристрою 4,82 В, але така різниця у вихідній напрузі обґрунтована наявністю осаду водяної пари з тильної сторони пристрою. Оскільки даний пристрій до цього вже використовувався для проведення інших дослідів в ньому залишилася частка води, яка не була видалена, а виходячи з першочергової ідеї нагріти дані панелі до однакової температури, залишки води дуже швидко та активно випарувалися і утворили шар з дрібних капель.

Після подачі теплоносія в пристрій, вихідна напруга змінилась, і для панелі з пристроєм склала 4,71 В, а для панелі без пристрою 4,52 В, при цьому вимірювання температури показали, що температура панелі без пристрою складає 45,5 °С, а температура панелі з пристроєм 36,5 °С.

Як можна побачити з вимірянних даних поглинання пристроєм сонячного дає зменшення в генерації електричної енергії є набагато менше ніж результат, який досягається шляхом охолодження даних панелей. Однак дана температура панелі з пристроєм обумовлена тим що в початковий момент часу вона знаходилась без теплоносія та нагрівалась. З роботою циркуляційного насосу приблизною продуктивністю 100 л/год фотоелектрична панель з

пристроєм продовжувала охолоджуватись і вже через 5 хвилин вихідна напруга склала 4,908 та 4,59 В для панелі з пристроєм та без відповідно.



Рисунок 3.20 – Фотоелектричні панелі під час дослідів (через пристрій прокачується теплоносіє)

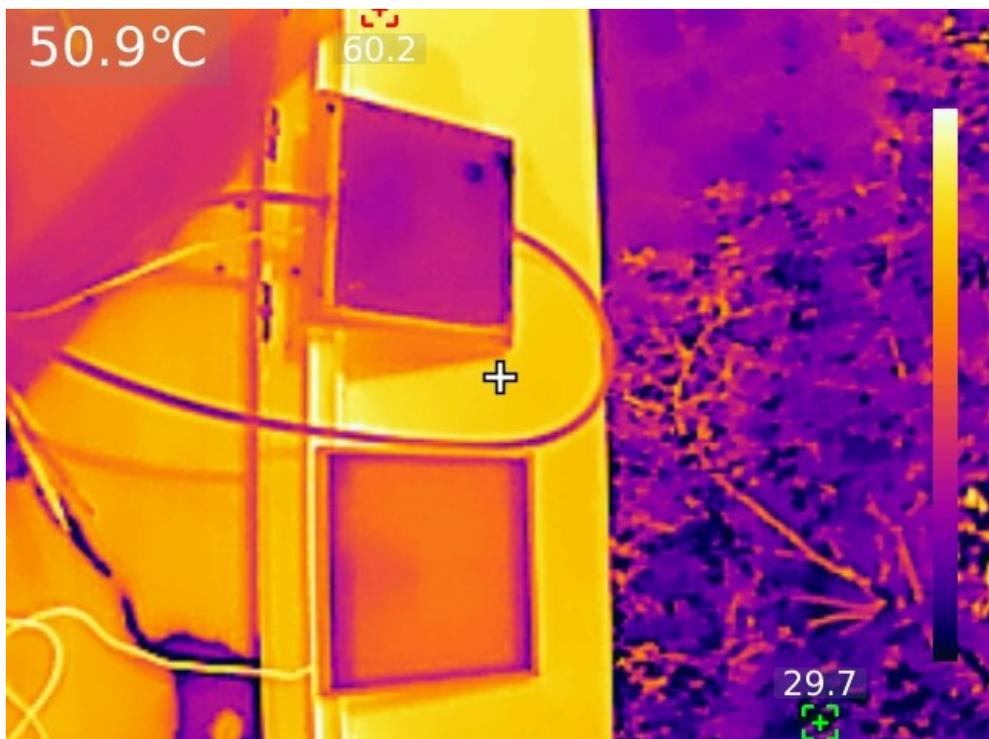


Рисунок 3.21 – Термограма фотоелектричних панелей в початковий момент дослідів

Різниця між температурами теплоносія на вході та виході при такій роботі циркуляційного насосу склала  $0,8^{\circ}\text{C}$ , тому продуктивність циркуляційного насосу було максимально зменшено до 80 л/год, але через 11 хвили протягом зменшення продуктивності насоса різниця у вихідних температурах суттєво не змінилась, а вихідна напруга складала 4,91 В та 4,52 В для панелі з пристроєм та без відповідно. Термограма панелей після зниження продуктивності насоса представлена на рисунку 3.22

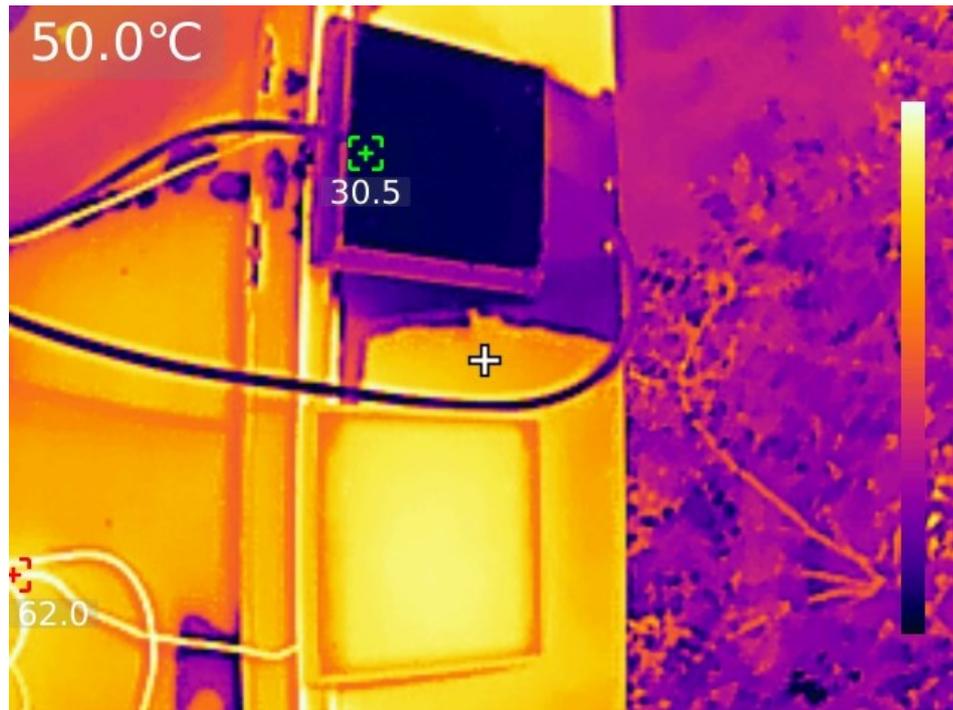


Рисунок 3.22 – Термограма панелей після зменшення продуктивності витрати теплоносія циркуляційним насосом

Для збільшення різниці температур між теплоносієм на вході та на виході робота циркуляційного насосу було зупинена на 15 хвилин, за цей час температура обох панелей підвищилась і при вимірюванні склала  $37^{\circ}\text{C}$  для панелі з пристроєм і  $60,3^{\circ}\text{C}$  для панелі без пристрою, при цьому вихідна напруга складала 4,9 В та 4,53 В відповідно. Термограма панелей при зупинці циркуляційного насосу наведена на рисунку 3.23.

Таким чином виходячи з цього можна зробити висновок, що в залежності від габаритних розмірів пристрою, робота циркуляційного насосу може не бути постійною, що відповідно буде підвищувати сумарне електричне

ККД системи, використання представленого пристрою є доцільним в реальних умовах та дає свій позитивний результат.

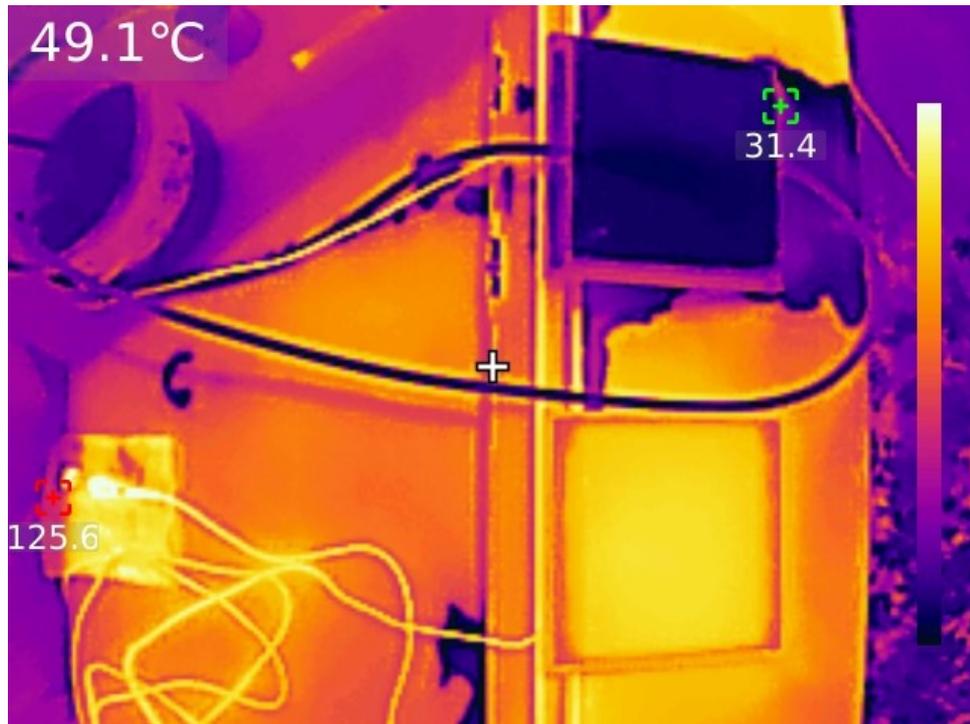


Рисунок 3.23 – Термограма панелей при зупинці циркуляційного насосу

### Висновки до розділу 3

1. Запропонована конструкція пристрою для реалізації методу підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних панелей шляхом перетворення їх у гібридний колектор має ряд характеристик, які дозволяють вирішити частину недоліків існуючих конструкцій, основною перевагою є те, що даний пристрій може бути виготовлений та встановлений на будь-яку існуючу фотоелектричну панель. Тобто, запропонований пристрій є модулем адаптації фотоелектричної панелі в гібридний колектор, отже будь-яка існуюча дахова електростанція може бути переобладнана за рахунок даного пристрою для отримання теплової енергії, та має суттєво менші капітальні витрати при використанні існуючих типів гібридних колекторів.

2. Зменшення світлового потоку за рахунок розташування додаткових шарів над поверхнею фотоелектричних елементів залежить певним чином від коефіцієнту пропускання світла склом, що для звичайного кварцового скла

складає 95%, а для надпрозорого скла 99%. Разом з тим на невеликих товщинах теплоносія у вигляді води більшість втрат світлового потоку припадає на інфрачервоний спектр, в той час як втрати видимого спектру, який перетворюється у електричну енергію в фотоелектричних панелях, є найменшими серед усього спектру, і складають близько  $0,1 \text{ Вт/м}^2$  поверхні.

3. Моделювання температури поверхні фотоелектричної панелі на основі отриманих даних про сонячну радіацію показав, що у довільний літній день температура поверхні фотоелектричної поверхні може сягати  $60\text{-}65^\circ\text{C}$ , що підтверджують експериментальні дані. В той самий час результати моделювання роботи сонячної панелі при такій робочій температурі поверхні можуть зменшувати сумарну кількість генерації електричної енергії до 30 %.

4. Моделювання теплових процесів запропонованої конструкції для реалізації методу підвищення ефективності використання сонячних фотоелектричних панелей за рахунок перетворення їх у гібридний колектор показало, що запропонована конструкція може досить ефективно охолоджувати фотоелектричну панель, при цьому різниця між теплоносієм та тілом нагрівання не перевищує  $5^\circ\text{C}$  в результаті правильно підбраного температурного режиму, збільшення генерації електричної енергії за рахунок зменшення температурних втрат перевищує втрати від зменшення світлового потоку шарами пристрою.

## РОЗДІЛ 4

### ПЕРСПЕКТИВИ, ПЕРЕВАГИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО ПРИСТРОЮ

При вирішенні завдань щодо перспектив використання запропонованої конструкції пристрою, яка перетворює сонячні фотоелектричні панелі в гібридний колектор перед усім необхідно вирішувати задачу, щодо використання підігрітого теплоносія. Оскільки як вже зазначалося в розділі 3, що даний пристрій переважно націлений на існуючі дахові електростанції комунального сектору, то питання щодо організації приєднання електричних мереж не розглядається. Відповідно до нормативних значень розрахункова температура подачі гарячої води в мережу гарячого водопостачання складає 55°C, при цьому діапазон може змінюватися від 50 до 70 °C. З попередніх розрахунків наведених в 3-му розділі було видно, що досягти температуру в 55 °C завдяки запропонованому пристрою можливо, але термін такого водозабору є вкрай обмежений в часі, і повністю ліквідує добавку електричної генерації фотоелектричних панелей. Тому в контексті перспектив використання даного пристрою необхідно вирішувати задачі, щодо саме використання підігрітого теплоносія.

#### 4.1 Схема використання теплоносія

В останні роки в Україні спостерігається значна тенденція, щодо скорочення систем централізованого гарячого водопостачання, на даний час місто Одеса, повністю відмовилася від системи централізованої ГВП, а такі системи наявні лише в окремих великих містах таких як Київ, Харків, Львів та ін. Разом з тим складна ситуація в країні з енергоресурсами та енергоносіями взагалі може поставити питання, щодо повної ліквідації таких систем, саме тому в більшості випадків люди переходять на індивідуальні водонагрівачі, або в сучасних житлових комплексах застосовуються індивідуальні групові водонагрівачі, які розраховані на постачання гарячої води в межах будинку або групи будинків.

Якщо взяти все індивідуальне гаряче водопостачання то найбільшу частку будуть мати електричні індивідуальні водонагрівачі, їх поширення обґрунтоване рядом переваг серед яких найбільша є доступність та легкість монтажу. Фактор доступності оцінюється не лише початковою вартістю виробу а й доступністю до первинного джерела енергії, а саме електричної енергії, яка є майже скрізь де є тривале перебування людей. Для таких водонагрівачів кількість спожитої електричної енергії, яка витрачається на нагрівання води прямо пропорційно залежить від різниці температур води на вході, тобто мережевою водою та температурою води на виході, тобто в точці водозабору. Якщо на вхід такого водонагрівача подавати не мережеву воду, а воду підігріту в пристрої, то також в межах одного об'єкту можливо досягти скорочення споживання електричної енергії. Схема організації такого водопостачання наведена на рисунку 4.1.

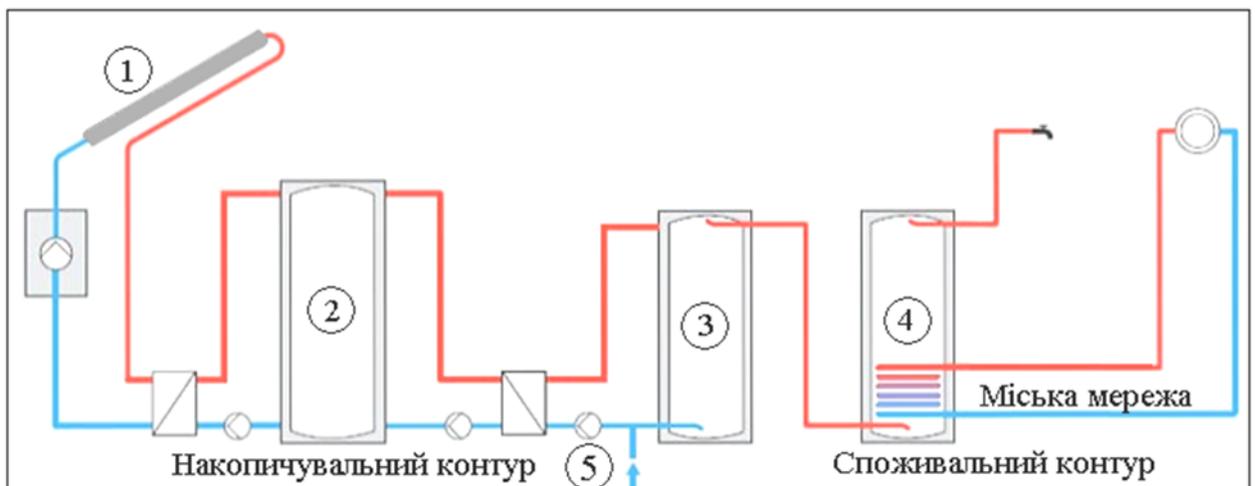


Рисунок 4.1 – Схема організації гарячого водопостачання від гібридного колектора

В даній схемі мережева вода за допомогою циркуляційного насосу закачується в пристрій (поз. 1), де нагрівається до встановленої температури, і за рахунок тиску, що створюється цим самим циркуляційним насосом, теплоносій після підігрівання потрапляє в накопичувальний бак (поз. 2). Накопичувальний бак в даному випадку встановлюється з метою згладжування коливань між процесам підігріву води та її споживання. Після накопичувального баку при індивідуальному водопостачанні теплоносій

повинен потрапляти безпосередньо у водонагрівач, де повинен догріватися до встановленої температури і виходити до споживача. При інтеграції даного пристрою в міську мережу після баку накопичувача, вода потрапляє в попередній водонагрівач (поз. 3), після чого вже безпосередньо у водонагрівач сполучений з міською мережею гарячого водопостачання (поз. 4). Окрім зазначених елементів також доцільним є встановлення байпасу, який би дозволяв подавати мережеву воду безпосередньо до водонагрівача, що є особливо актуальним у зимовий період, коли зазначена система не зможе функціонувати.

Але практика показує, що споживання гарячої води побутовими споживачами влітку набагато менша ніж взимку, і разом з тим діапазон температур при якому відбувається водозабір також менший, що може викликати недостатній обсяг споживання гарячої води. Саме тому найбільша перспектива у використанні таких пристроїв віддається комунальним лікарням зі стаціонарними відділеннями. Обстеження найбільших лікарень міста Одеси показало, що в майже всіх випадках гаряче водопостачання відбувається від електричних водонагрівачів, а кількість дахових сонячних електростанцій які споруджуються на покрівлях лікарень стрімко зростає. Наявність стаціонарів в таких закладах стрімко збільшує споживання гарячої води, тому при і питомі обсяги отримання теплоносія та його споживання є спів розмірні і виникнення залишку теплоносія є мінімізованим.

Приклад дахової сонячної електростанції з монокристалічними фотоелектричними панелями JA SOLAR JAM72S30-550/MR 550 WP, які можуть бути перетворені у гібридні колектори наведено на рисунку 4.2.

Всього на представленій покрівлі розташовується 104 фотоелектричні панелі, що мають великий потенціал для додаткового отримання теплової енергії.



Рисунок 4.2 – Дахова сонячна електростанція на покрівлі Міської дитячої лікарні № 3 в місті Одеса

#### **4.2 Переваги використання пристрою для перетворення фотоелектричних панелей у гібридний колектор**

Зростання ефективності генерації електроенергії фотоелектричними модулями супроводжується прогнозованим зменшенням впливу Potential Induced Degradation (PID) – одного з ключових факторів, що призводять до втрати потужності сонячних панелей. PID-деградація є комплексним явищем, що проявляється у вигляді поступового зниження вихідної потужності фотоелектричних модулів під час їх експлуатації. Вона може виникати як в окремих модулях, так і в масштабах всієї сонячної електростанції, де модулі з'єднані послідовно.

Наукові дослідження дозволяють виділити два основних види PID-деградації:

- Реверсивна (поляризаційна) PID-деградація
- Нереверсивна PID-деградація (електрохімічна корозія).

Реверсивна PID-деградація виникає у разі, коли поверхня фотоелектричних панелей або елементів, на яких вони розташовані, отримує від'ємний потенціал відносно землі.

Причиною цього є:

- Неякісна ізоляція контактів, що призводить до виникнення паразитних струмів;
- Хімічні властивості матеріалів, зокрема наявність домішок натрію у склі та полімерних плівках;
- Процеси дифузії іонів натрію у поверхневих шарах скла та електричних контактів, що спричиняють поляризацію *p-n* переходів та локальні короткі замикання.

В результаті поляризаційної PID-деградації у фотоелектричних панелях може виникати значна різниця потенціалів між шарами матеріалу, що порушує нормальне функціонування *p-n* переходів, тимчасово зменшуючи їхню продуктивність. У деяких випадках така деградація може бути частково усунена шляхом зміни режиму роботи сонячної панелі або застосування спеціальних методів репасивації контактів.

Нереверсивна PID-деградація на відміну від реверсивної є незворотньою і призводить до поступового руйнування матеріалів сонячних панелей.

Основні причини нереверсивної PID-деградація виступають:

- Корозія металевих елементів через потрапляння вологи у вигляді дощу, снігу або конденсату. Навіть за наявності захисних покриттів, з часом вони втрачають ефективність під впливом механічних навантажень та температурних коливань.
- Руйнування полімерних та скляних елементів під впливом ультрафіолетового випромінювання та механічних пошкоджень. УФ-промені сприяють фотодеградації матеріалів, викликаючи втрату прозорості та механічну крихкість.
- Формування мікротріщин у фотоелектричних елементах через перепади температур. Волога, що проникає у ці тріщини, розширюється при замерзанні, збільшуючи механічні пошкодження та сприяючи подальшій деградації.

Наукові дослідження дозволяють виокремити такі основні фактори, що значно впливають на виникнення PID-деградації:

- Погодні умови такі як висока вологість, екстремальні температури та їхні різкі зміни.
- Забруднення та потрапляння сторонніх предметів у вигляді пилу, бруд та механічні пошкодження, що знижують ефективність світлопропускання.
- Дефекти у виробництві та конструкційні помилки – використання неякісних матеріалів або конструктивні недоліки можуть спричиняти прискорене старіння модулів.
- Недостатня ізоляція контактів сприяє утворенню паразитних струмів та виникненню потенційної різниці між шарами матеріалу.

Неправильний вибір інвертора – використання інверторів, що створюють високу напругу відносно землі, сприяє прискоренню PID-деградації.

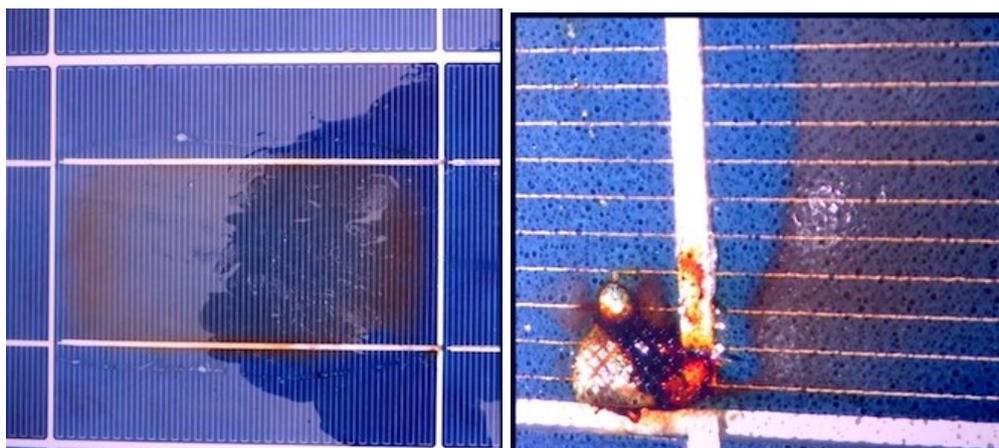


Рисунок 4.3 – Наслідки впливу високих температур на фотоелектричні панелі

Ультрафіолетове випромінювання, майже не чинить ніякого впливу на фотоелектричні панелі, які виконані з кремнію за моно- або полікристалічними технологіями, оскільки вплив УФ випромінювання на скло, яким оздоблені панелі відсутній, однак дане випромінювання може впливати тонкоплівкові сонячні панелі за рахунок деструкції самих плівок під дією УФ випромінювання.

Таким чином на основі усього вище зазначеного, можна зробити висновок, що коливання робочої температури фотоелектричних панелей є

одним із ключових факторів, що впливають на PID деградацію обох видів. При встановленні на фотоелектричну панель пристрою для перетворення її у гібридний колектор, робоча температура має знизитися і бути постійною, що в свою чергу повинно позитивно впливати на фактори, які були перераховані.

#### **4.3 Економічна оцінка використання пристрою**

Економічна оцінка ефективності впровадження проводиться для представленої на рисунку 3.2 дахової сонячної фотоелектричної станції Міської дитячої лікарні № 3 в місті Одеса. Розташування поліклініки наведено на рисунку 4.4.

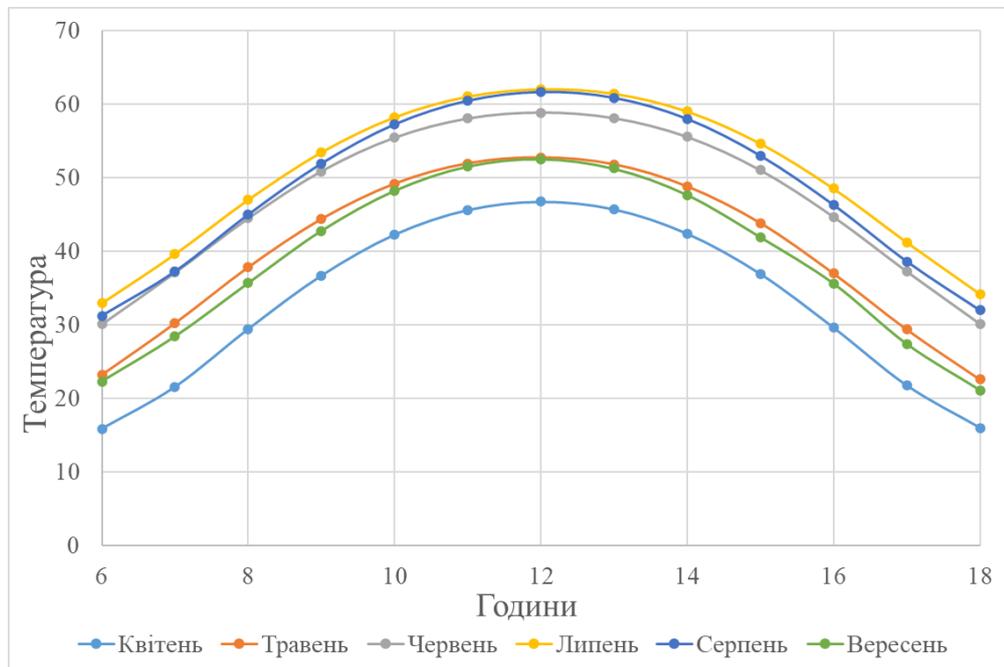


Рисунок 4.4 – Розташування Міської дитячої лікарні № 3

Оскільки орієнтація лікарні не чітка, то визначається азимут вісі лікарні відповідно півдня, який складає  $41^\circ$ , і з урахуванням того що дахова фотоелектрична станція встановлена за допомогою баластної системи кріплення, яка має кут нахилу  $15^\circ$ , то для даних вихідних параметрів проводиться перерахунок інтенсивності сонячної інсоляції на поверхню фотоелектричних панелей за допомогою моделі Hottel, яка наведена в 2 розділі. Середньодобові суми для 15 дня кожного місяця наведені на рисунку 4.5.

Для кожного місяця для 15 дня місяця визначається погодинна робоча температура фотоелектричної панелі, з урахуванням середньомісячних показників швидкості вітру та середньомісячної температури зовнішнього повітря. Погодинні значення температури фотоелектричного модуля для кожного місяця наведені на рисунку 4.5.

Відповідно до отриманих результатів температури проводиться перерахунок втрат електричної енергії за рахунок перегрівання фотоелектричної панелі. При розрахунках приймалась втрата генерованої електричної енергії, лише коли температура перевищувала, робочу температуру пристрою, яка складає 35°C.



Рисунк 4.5 – Зміна робочої температури протягом доби для кожного місяця коли може працювати пристрій

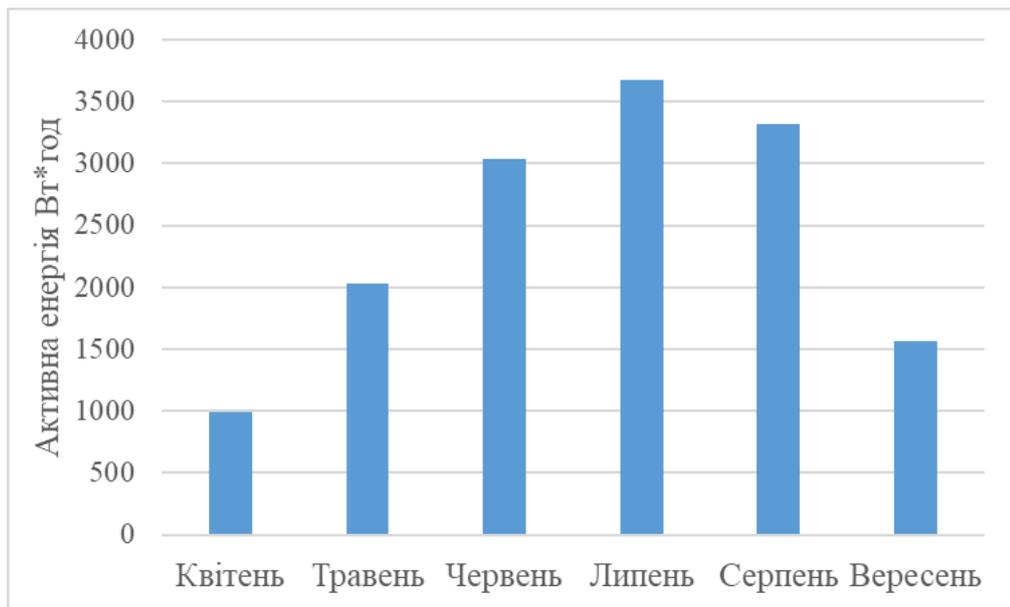


Рисунок 4.6 – Місячна втрата електричної енергії з 1 м<sup>2</sup>, площі що опромінюється

Таким чином з 1 м<sup>2</sup> площі сонячних фотоелектричних панелей за рік можна досягти 14,62 кВт·год додаткової енергії, що з урахуванням габаритних розмірів встановлених фотоелектричних панелей JA SOLAR JAM72S30-550/MR 550 WP, які складають 2279x1134x35 мм, та загальної кількості встановлених панелей, сумарна кількість електричної енергії, яку можна додатково отримати за рахунок встановлення пристроїв складає 3344,63 кВт·год за рік.

Оскільки дана сонячна електростанція розрахована лише на власне електроспоживання, без видачі електричної енергії в зовнішню мережу, то фінансова оцінка проводиться по звичайному тарифу за яким лікарня розраховується з оператором системи розподілу. Тариф формується на основі таких складових:

- купівля електричної енергії у розмірі (середньомісячний тариф) 3996,86 грн/(МВт·год) без ПДВ та 4796,23 грн/(МВт·год) з урахуванням ПДВ [32];

- тариф на послуги з передачі електричної енергії для побутових споживачів з 01.01.2024 р. відповідно до постанови НКРЕКП № 2322 складає

528,57 грн/(МВт·год) у тому числі підтримка виробників зеленої електроенергетики 191,36 без ПДВ та 634,28 грн/(МВт·год) з ПДВ [33];

- тариф на розподіл електроенергії для непобутових споживачів з 01.01.2024 р за 1 МВт·год, без врахування НДС для ДТЕК Одеські електромережі складає 1872,98 грн, з урахуванням ПДВ 2247,57 грн [34];

- тариф на диспетчеризацію складає 104,57 грн/(МВт·год) без врахування ПДВ та з урахуванням відповідно 125,48 грн/(МВт·год).

Таким чином, сумарна вартість 1 кВт·год для непобутового споживача становить 7,69 грн/(кВт·год), однак відповідно до договору про закупівлю електричної енергії, що розміщений на офіційному сайті Одеської міської ради [29], на початок 2023 року, у Дитячої міської лікарні № 3 був укладений договір в якому вартість 1 кВт·год встановлена на рівні 5,85 грн, однак інформації про підвищення тарифу відповідно до нових тарифів наведених вище, які вступили в дію після укладання договору не наведено, тому розрахунок економії електричної енергії проводиться відповідно до тарифу зазначеного в договорі.

З урахуванням даного тарифу на 1 кВт·год електричної енергії сумарна вартість додатково згенерованої потужності складає 19566,1 грн.

З рівняння теплового балансу наведеного в 3 розділі для кожного місяця знаходяться граничні обсяги теплової енергії, які можна отримати при різних температурах, результати визначення обсягів наведені в таблиці 4.1, а залежність зміни отриманої енергії від температури на рисунку 4.7. Для визначення даних обсягів враховується кількість енергії, яка необхідна, щоб нагріти теплоносії до заданої температури, після чого отримане значення порівнюється з енергією, яка може бути отримана за вирахуванням конвекційних та радіаційних втрат а також з урахуванням частки яка перетворюється на електричну енергію.

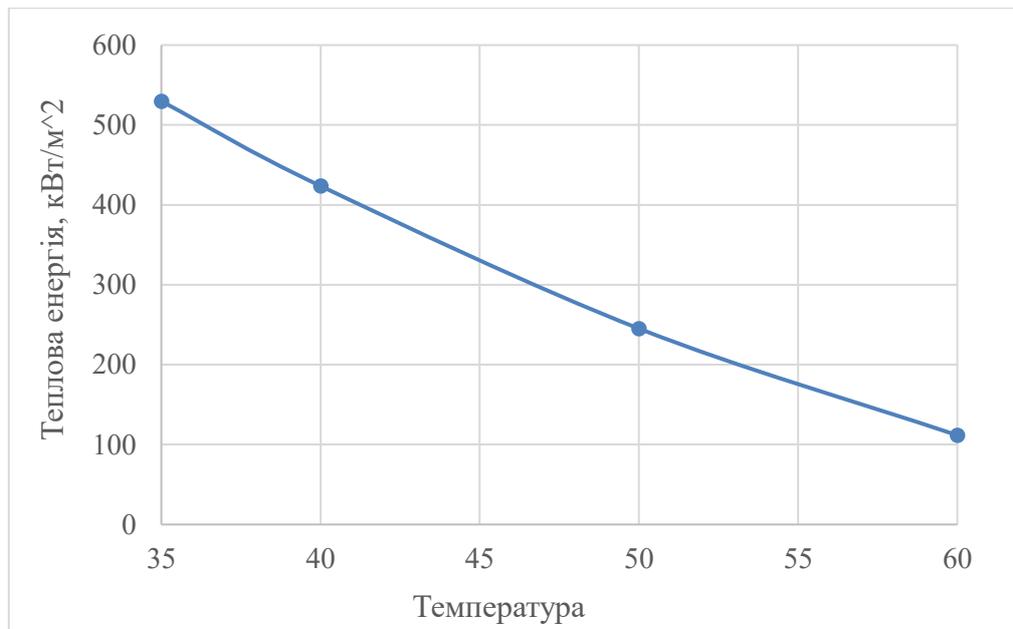


Рисунок 4.7 – Зміна отриманої річної теплової енергії в залежності від температури

Таблиця 4.1 – Питомі об'єми теплоносія при різних температурах

Температура, °C	35	40	50	60
Обсяги теплової енергії з 1 м <sup>2</sup> за рік, кВт·год	529,8	423,6	245,2	111,7

Зменшення обсягів енергії зі збільшенням температури обумовлено насамперед зменшенням часу роботи, який враховується в сумі. Оскільки зі збільшенням температури, кількість енергії яка необхідно збільшується, то це потребує більшої інтенсивності сонячної інсоляції, що відповідно обмежує години використання, тому сумарна об'єм отриманої енергії зменшується.

Як зазначалося раніше, отриманий теплоносій буде подаватися на вхід до водонагрівача, для його догрівання до встановленої температури на якій відбувається водозабір.

Для проведення фінансової оцінки буде розглядатися два варіанти, коли нагрів води відбувається електричними водонагрівачами та за допомогою газових котлів.

Обсяги зекономленого первинного енергоносія за рахунок подачі на вхід води з більшою температурою можна обчислити за формулою

$$B = \frac{E_{sol}}{q_{spec}\eta}, \text{ м}^3, \quad (4.1)$$

де  $E_{sol}$  – кількість енергії, що отримана від сонця, кВт·год;

$q_{пер}$  – теплотворність первинного енергоносія (10,02 (кВт·год)/м<sup>3</sup> для природнього газу);

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії водонагрівача, в. о.

Таким чином, з 1 м<sup>2</sup> площі пристрою для перетворення фотоелектричних панелей у гібридний колектор при нагріванні теплоносія до 35 °С, та з урахуванням температури мережевої води при температурі 20 °С, обсяги зекономленої електричної енергії приймаються рівними обсягам отриманої енергії від сонця, оскільки ККД перетворення електричної енергії у теплову для сучасних водонагрівачів дуже близький до 1. При використанні в якості первинного палива природного газу, можна досягти економії з 1 м<sup>2</sup> за рік близько 52 м<sup>3</sup> газу, що при середній вартості для юридичних осіб 15,9 грн[31] складатиме 804 грн з 1 м<sup>2</sup> за рік.

Теоретично можливі об'єми теплоносія з 1 м<sup>2</sup>, можна визначити як

$$V_{hot} = \frac{B}{c(t_{hot} - t_{col})}, \text{ м}^3, \quad (4.2)$$

де  $c$  – питома теплоємність води, (1,17 кВт·год);

$t_{hot}$  – температура нагрітого теплоносія, °С;

$t_{col}$  – температура теплоносія на вході °С.

Таким чином з 1 м<sup>2</sup> за сезон можливо отримати приблизно 30,2 м<sup>3</sup> підігрітого теплоносія, що при загальній площі дахової СЕС становитиме

6279 м<sup>3</sup>/рік, однак варто враховувати, що відповідно до договору про водопостачання Дитячої міської лікарні, який розташований у відкритому доступі на сайті Одеської міської ради [29], річний обсяг водоспоживання лікарні з міського водопроводу складає 9564,41 м<sup>3</sup>/рік, якщо розподілити даний обсяг води рівномірно на 12 місяців, то місячне споживання лікарні приблизно становить 797 м<sup>3</sup>. У відповідності до Закону України «Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання» [30], середнє нормативне відношення споживання холодної води до гарячої становить 1,5 рази, що відповідно для місячного споживання лікарні буде складати приблизно 260 м<sup>3</sup> гарячої води на місяць. З урахуванням тривалості сезону використання пристрою, який триває 6 місяців з квітня по вересень, ефективний об'єм теплоносія, який може бути використаний становить 1560 м<sup>3</sup>, що складає приблизно 25% від теоретично можливого, тоді ефективний обсяг енергії, який можна зекономити за рахунок використання пристрою з оберненої формули (4.2) становить 27,4 МВт·год/рік, що в перерахунку на вартість ЕЕ становить 160 290 грн/рік, а в перерахунку на природній газ 43 479 грн/рік.

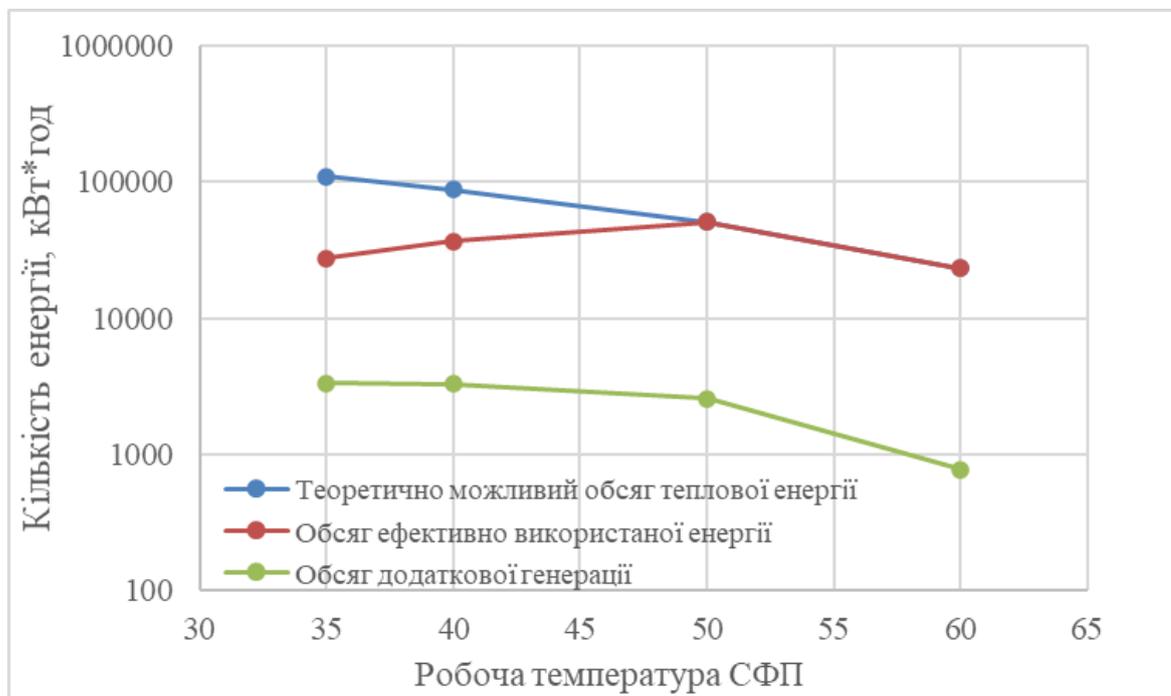


Рисунок 4.7 – Обсяги електричної енергії, які можливо отримати при використанні пристрою

Як можна побачити з рисунку 4.7, що при підвищенні температури теплоносія до 50 °С, можливо досягти повного використання об'єму теплоносія, що відповідно збільшує ефективність використання отриманої теплової енергії, однак таке збільшення температури призводить до збільшення температурних втрат і зменшення генерації власне електричної енергії СФП, що при даній різниці температур складає приблизно 800 (кВт·год)/рік, таке зменшення генерації електричної енергії може бути обумовлено значним збільшенням отримання теплової енергії, що збільшується майже в 2 рази, однак дане рішення повинне прийматися з урахуванням пріоритетності того чи іншого виду енергії, оскільки в даній роботі основна увага приділяється збільшенню електричної енергії, то параметри теплоносія залишаються на рівні 35 °С.

#### **4.4 Собівартість спорудження пристрою**

У відповідності до зазначеної у розділі 3 конструкції пристрою для підвищення ККД, шляхом перетворення сонячних фотоелектричних панелей на гібридний колектор, для його спорудження необхідні такі матеріали:

- скло безбарвне марки М1 товщиною 4 мм;
- дистанційний профіль П-подібний, алюмінієвий 15x10x1,5 мм;
- два вивідних патрубки з різьбою діаметром 10 мм;
- герметик.

Оскільки витрата матеріалу залежить від фотоелектричної панелі на якій розташовується пристрій, то розрахунок вартості проводиться для панелі JA SOLAR JAM72S30-550/MR 550 WP.

За даними компанії «Вітражна композиція» вартість 1 м<sup>2</sup> зазначеного скла складає 480 грн, П-подібний профіль коштує 67 грн за 1 м. пог. за даними магазину «Leroy Merlin», вихідний патрубок INTERTOOL PT-2303 можна придбати за 26 грн/шт, що стосується герметиків, то вони представлені на ринку широким асортиментом з великою ціновою різноманітністю, але для спорудження даного пристрою, було обрано поліуретановий клей-герметик

вартістю 250 грн за 1 тубу об'ємом 290 мл. Таким чином сукупна вартість спорудження пристрою для фотоелектричної панелі SOLAR JAM72S30-550/MR 550 WP складає 2010 грн, з урахуванням обсягів сонячної електростанції сукупна вартість проекту складатиме 209 040 грн, відповідно до економії енергії, які будуть отриманні за рахунок встановлення пристрою розраховується дисконтований термін окупності, при ставці дисконту 20 %.

Прибуток в даному розрахунку приймається за найменш привабливим показником прибутку, тобто для варіанту коли догрівання теплоносія відбувається з використанням природного газу, тоді вартість зекономленого природного газу становить 43 479 грн/рік, і вартість додатково згенерованої електричної енергії становить 19566,1, що в сумі дає річну економію на рівні 63045 грн. Тоді для даного варіанту графіки дисконтованого терміну окупності та внутрішньої норми прибутку наведені на рисунку 4.8 та 4.9 відповідно.



Рисунок 4.8 – Динаміка чистої приведеної вартості проекту

Як можна побачити з динаміки чистої приведеної вартості проекту термін окупності складає приблизно 5 років, але з урахуванням стрімкої інфляції на енергоносії, цей показник може значно скорочуватися. Внутрішня норма прибутку даного проекту представлена на рисунку 4.9.

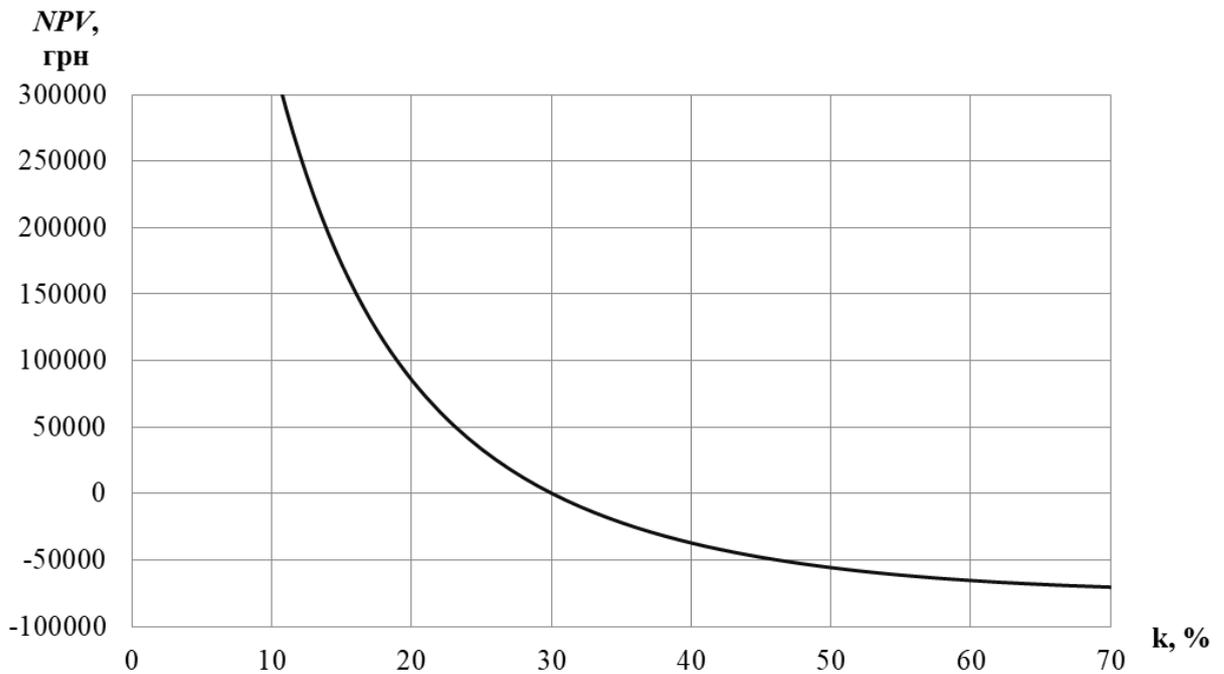


Рисунок 4.9 – Динаміка внутрішньої норми прибутку

Оскільки даний пристрій може використовуватися не лише для підвищення ефективності використання СЕС, що розташовуються на дахах комунальної власності, а і для СЕС що розміщуються на дахах багатоквартирних будинків, то проводиться розрахунок термінів окупності для тих самих обсягів енергії, що додатково отримується від сонячної системи протягом року, але з урахуванням тарифів для побутових споживачів, які становлять 4,32 грн/(кВт·год) електричної енергії та 7,96 грн/м<sup>3</sup> природного газу за умови що постачальником є ТОВ ГК «Нафтогаз України» [35].

Тоді вартість додатково згенерованої електричної енергії складає 14 448,8 грн/рік, а вартість зекономленого природного газу становить 21 766,9 грн/рік, що в сумі дає річної економії на 36 215,7 грн/рік. В цьому випадку термін окупності наведений на рисунку 4.10.

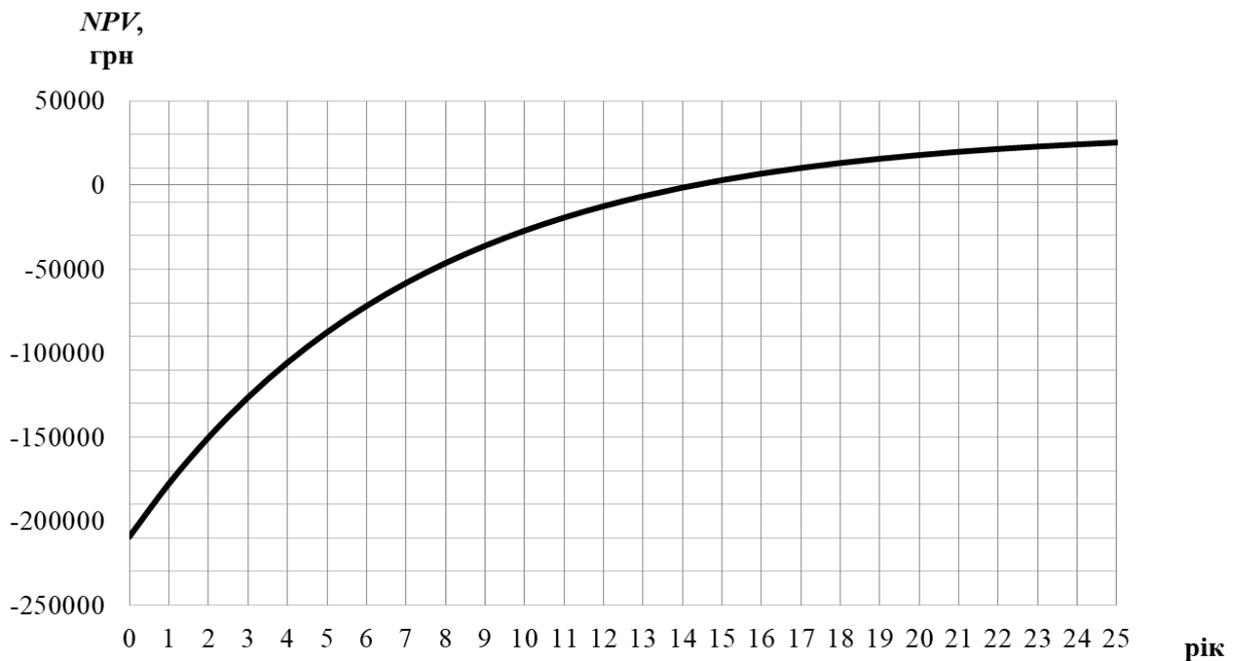


Рисунок 4.10 – Графік термінів окупності перетворення сонячних панелей в гібридний колектор для тарифів побутового споживача

При розрахунках за тарифами побутового споживача термін окупності зростає більше ніж у 2 рази та складає близько 12 років, однак дане порівняння є суто умовне, оскільки відповідно до норм використання води [30] для житлових багатоквартирних будинків обсяги використання води як холодної так і гарячої значно більші, що відповідно дозволяє більш повно використовувати наявні теплову енергію з теоретично можливих обсягів, що в результаті суттєво зменшить термін окупності.

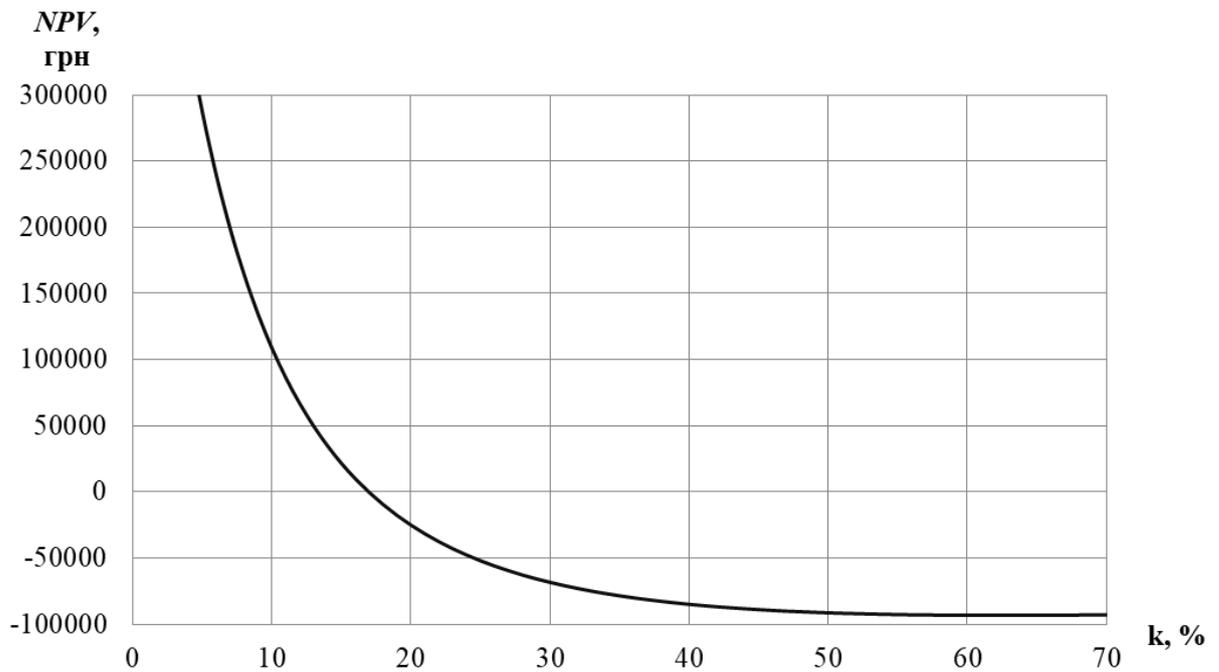


Рисунок 4.9 – Динаміка внутрішньої норми прибутку для варіанту з тарифами побутових споживачів

Однак спорудження даної системи потребує не лише матеріалів на спорудження та встановлення пристрою, а ще і на спорудження системи збору, розподілу та накопичення теплоносія. Прорахунок вартості даної системи є досить складним та залежить від багатьох особливостей існуючих інженерних мереж будівлі, тому для оцінки ефективності проводиться порівняння двох варіантів гібридних колекторів, відповідно запропонованої конструкції та існуючої моделі ATMOSFERA F2PV, яка представлена на ринку. Оскільки для обох конструкцій необхідно споруджувати систему водопостачання та водовідведення, то її вартістю ми знехтуємо, а порівняння проведемо за питомою вартістю 1 кВт·год сукупної енергії протягом гарантійного терміну експлуатації.

Зазначений колектор ATMOSFERA F2PV, має загальну потужність 1337 Вт, при габаритних розмірах 1006x2007x85, що дуже схоже на розміри запропонованого пристрою на базі сонячної монокристалічної панелі SOLAR JAM72S30-550/MR 550 WP. Відповідно до моделі сонячного надходження Hottel наведеної у розділі 2 проводиться розрахунок енергії, яку можна отримати використовуючи гібридний колектор ATMOSFERA F2PV, оскільки

зазначена потужність регламентується при нормі інтенсивності сонячної радіації у  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , то з урахуванням азимуту орієнтації панелей та кута нахилу, обсяги згенерованої енергії представлені на рисунку 4.10. Розрахунок теплової енергії, проводиться для того ж самого періоду з квітня по вересень для якого розраховувались обсяги теплової енергії пропонованого пристрою.

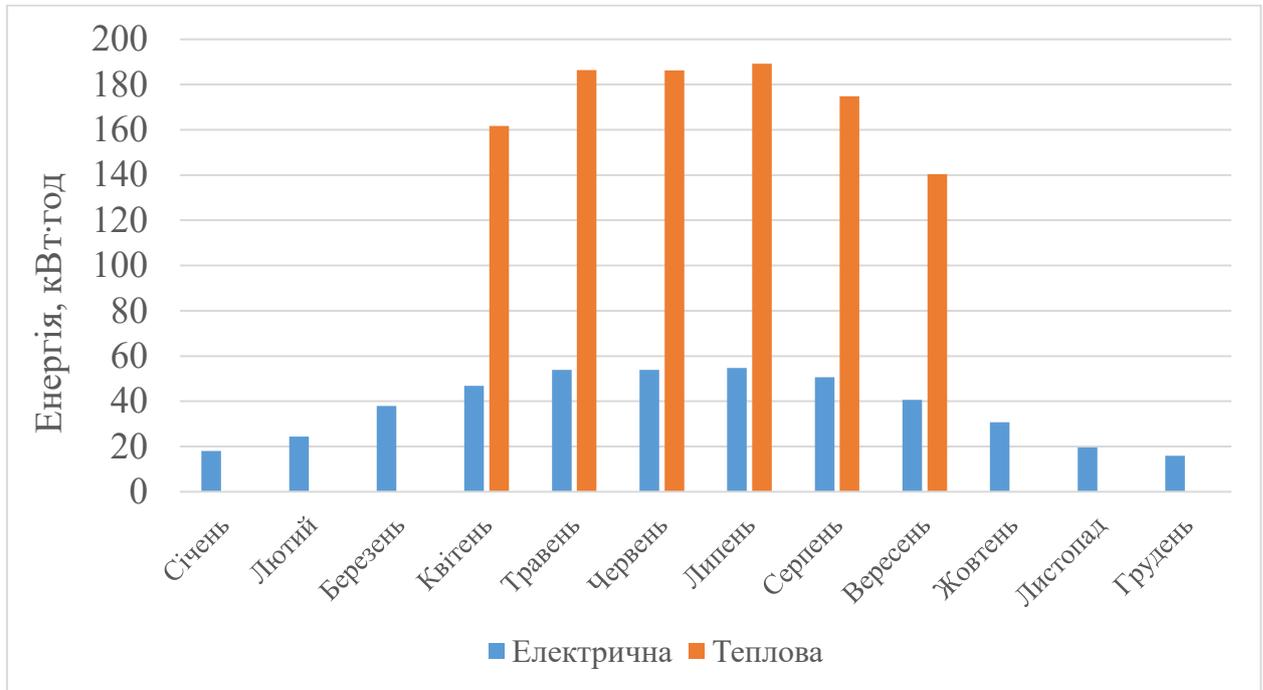


Рисунок 4.10 – Структура річної генерації енергії гібридним колектором ATMOSFERA F2PV

За рік сукупна генерація, одного гібридного колектора ATMOSFERA F2PV електричної енергії складає 447,15 кВт·год, та теплової 1038,9 кВт·год.

Відповідно до даних виробника вартість одного гібридного колектору ATMOSFERA F2PV складає 812 євро, що за курсом складає 36270 грн, з урахуванням виробленої енергії за 20 років таким гібридним колектором вартість 1 кВт·год складає 1,22 грн, в той час як система з пропонованою конструкцією пристрою для перетворення фотоелектричної панелі у гібридний колектор за рік генерує 819,8 кВт·год електричної енергії та 263,5 кВт·год теплової енергії, яка може бути ефективно використана з урахуванням обсягів споживання гарячої води Дитячої міської лікарні № 3. За той самий термін 20 років, питома вартість 1 кВт·год складатиме 0,47 грн, що майже у три

рази менше. Якщо прийняти умову, що використовуватися може вся теплова енергія, яка генерується пропонованою конструкцією то загальна вартість 1 кВт·год становитиме 0,27 грн.

Однак дана цифра є не остаточною, оскільки при обчисленні обсягів енергії, що можна отримати від гібридного колектора ATMOSFERA F2PV не враховувалось зменшення генерації електричної енергії при збільшенні робочої температури фотоелектричної панелі, а технічні характеристики надані виробником не дають чіткої конкретики про обсяги та параметри теплоносія який можна отримати на виході з цього колектора, що в подальшому може призвести до зменшення сукупної генерації теплової енергії, і як наслідок збільшити питому вартість 1 кВт·год.

#### **4.5 Підвищення ККД сонячних фотоелектричних панелей**

З урахуванням технічних характеристик сонячних фотоелектричних панелей JA SOLAR JAM72S30-550/MR 550 WP, кількості даних панелей та втрат електричної енергії в системі, річний прогнозований обсяг електростанції, що розташовується на даху Дитячої міської лікарні № 3 складає 68,35 МВт·год/рік, з урахуванням отримання додатково 3,34 МВт·год/рік електричної енергії сумарна ефективність системи в електричній частині зростає на 5%. При умові ефективного використання теплової енергії в обсязі 27,4 МВт·год/рік то ефективність системи збільшується на 45%, а якщо використовувати всю теоретично можливу теплову енергію, то сумарна ефективність збільшиться на 166%

Тенденція зміни сумарної ефективності при різних температурах наведена на рисунку 4.11.

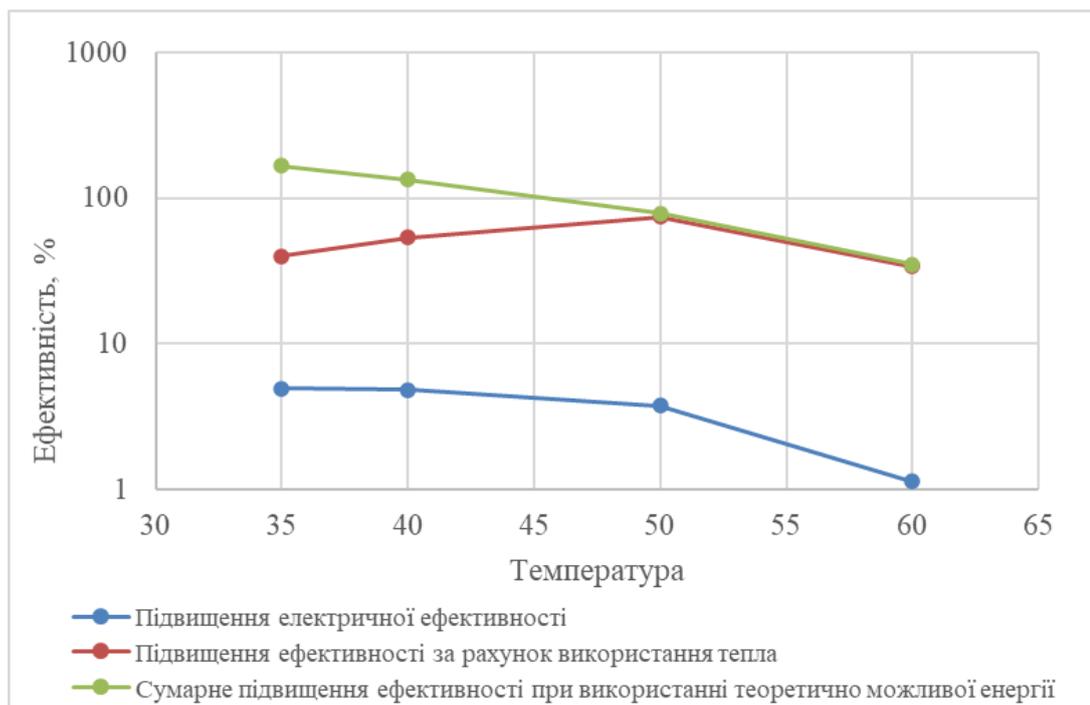


Рисунок 4.11 – Зміни ефективності СФП при різній температурі теплоносія

#### Висновки до розділу 4

1. Запропонована конструкція пристрою для підвищення ККД фотоелектричних панелей шляхом перетворення їх на гібридний колектор, є економічно ефективною та конкурентоспроможною в порівнянні з представленими на ринку конструкціями гібридних колекторів, оскільки використовує поширені матеріали у невеликих кількостях.

2. Детальна фінансова оцінка показала, що проект на 104 монокристалічні панелі може окупити себе за 9,5 років при існуючих цінах та без урахування інфляції. В результаті порівняння існуючої конструкції та запропонованої було визначено, що запропонована конструкція має у 2 рази меншу питому вартість 1 кВт·год, що є гарним результатом, однак розраховані значення генерації теплової енергії колектором існуючої конструкції є теоретичними та не враховують реальних умов експлуатації, що в свою чергу може призвести до ще більшої різниці у питомій вартості 1 кВт·год.

3. Найбільша ефективність від впровадження даного методу спостерігається при температурі теплоносія на рівні 35°C, хоча за даної

температури водозабір для безпосереднього використання в системі гарячого водопостачання не є доцільним, проте його використання для подачі в якості живильної води для водонагрівачів системи ГВП дозволяє суттєво зменшити кількість спожитої електричної енергії при використанні електричних водонагрівачів або природного газу при використанні водогрійних котлів.

4. Точна оцінка термінів окупності впровадження методу залежить від тарифів на первинні енергоносії та обсяги споживання гарячої води. Найбільш привабливими в цьому плані є об'єкти комунальної власності зокрема лікарні, реабілітаційні центри, дитячі будинки тощо, де обсяги споживання гарячої води є значними впродовж всього року, що дозволяє максимально повно використовувати весь обсяг одержаного теплоносія.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором нові науково обґрунтовані результати, що дозволили розробити метод підвищення ефективності використання сонячних фотоелектричних панелей шляхом перетворення їх у гібридний колектор. Даний пропонований метод реалізований за рахунок використання спеціальних пристроїв, що дозволяють комбіновано отримувати електричну та теплову енергію з будь-якої фотоелектричної панелі. Використання даного методу дозволяє підвищити сумарні енергетичні характеристики фотоелектричних панелей, сприяє більш кращому робочому режиму фотоелектричних панелей та сприяє покращенню енергетичної ефективності.

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

1. Було проведено комплексний аналіз сучасного стану фотоелектричних панелей із врахуванням особливостей їх технологічного виробництва, ефективності роботи в різних умовах експлуатації, а також переваг і недоліків різних конструктивних рішень. Встановлено, що одним із основних обмежень усіх відомих фотоелектричних панелей є зниження продуктивності генерації електричної енергії через нагрівання напівпровідникових елементів, що призводить до зменшення їх коефіцієнта корисної дії. На основі аналізу літературних джерел визначено, що одним із найбільш перспективних підходів до підвищення ефективності фотоелектричних систем є використання гібридних колекторів. Ці пристрої поєднують у собі фотоелектричний модуль та тепловий колектор, що дозволяє не лише отримувати електроенергію, а й ефективно відводити та використовувати надлишкове тепло, для нагріву теплоносія у будь-якому вигляді. Завдяки цьому зменшується перегрів напівпровідникових елементів, що сприяє підвищенню їх ККД та продовженню терміну експлуатації. В результаті проведеного аналізу основних досліджень та конструкцій гібридних колекторів було встановлено, що для наших кліматичних умов найбільш ефективним є застосування рідинних гібридних колекторів, а при розгляді існуючих конструкцій

гібридних колекторів представлених на ринку електротехнічної продукції було виявлено ряд недоліків, які пропонувалося вирішити.

2. При аналізі факторів, що найбільше впливають на роботу сонячних фотоелектричних панелей було встановлено, що температура та загальна ефективність фотоелектричних панелей безпосередньо залежать від кількості сонячної інсоляції на поверхні, тому задачі пов'язані з вирішенням проблем щодо робочої температури та ефективності роботи фотоелектричних панелей потребують насамперед розгляду моделей сонячних надходжень. Проведений аналіз математичних моделей, що використовуються для прогнозування інтенсивності сонячної радіації, показав, що більшість з них є некоректними для розрахунків у нашому регіоні. Це пов'язано з тим, що такі моделі базуються на емпіричних коефіцієнтах, визначених для конкретних географічних зон, у той час як для нашого регіону доступні лише універсальні коефіцієнти. Використання цих коефіцієнтів призводить до значної похибки у прогнозуванні, що ускладнює точне моделювання ефективності сонячних фотоелектричних панелей. Розрахунки, проведені за допомогою кількох математичних моделей, показали значні відмінності у результатах, а в окремих випадках прогнозовані значення були навіть фізично недосяжними для даного регіону. Порівняння отриманих розрахункових даних із експериментальними спостереженнями, проведеними на метеорологічному посту, показало, що найбільш точні результати дає модель Hottel. Однак, наявність суттєвих похибок у її прогнозах була зумовлена тимчасовими збоєм у роботі метеорологічного посту, що могло вплинути на достовірність вхідних даних. Значні похибки розрахункових значень, навіть у найбільш точних моделей, реалізованих у спеціалізованих закордонних програмних комплексах, свідчать про необхідність попередньої перевірки та калібрування програмних моделей на основі локальних кліматичних даних. Це дозволить підвищити точність оцінки ефективності використання СФП у конкретному регіоні. Врахування регіональних особливостей інтенсивності сонячної радіації, метеорологічних факторів та їх динамічних змін є критично важливим для достовірного

прогнозування продуктивності фотоелектричних систем та оптимізації їхньої роботи.

3. Запропонований метод підвищення ефективності використання фотоелектричних панелей можливо реалізувати за допомогою спеціальних пристроїв. Запропонована конструкція дозволяє перетворювати існуючі фотоелектричні панелі у гібридний колектор з рахунок встановлення спеціального світлопрозорого екрану, простір якого заповнюється теплоносієм. За рахунок встановлення додаткових шарів спостерігається зменшення інтенсивності сонячної інсоляції безпосередньо на самих кремнієвих фотоелектричних елементах, однак при визначених товщинах шарів та параметрах матеріалів, зменшення ефективності у видимому спектрі сонячного світла складає близько 1,6%. Моделювання роботи фотоелектричної панелі дозволило встановити, що найбільші втрати максимальної потужності спостерігаються при більших рівнях інтенсивності сонячної радіації, тобто в час найбільш активної роботи фотоелектричних панелей, різниця в рівнях максимальної потужності при інтенсивності  $800 \text{ Вт/м}^2$ , для температури 300 К та 360 К склала понад 30 %, при цьому температурний коефіцієнт даної моделі склав приблизно 0,55%/К. Визначення робочої температури панелі показало, що перегрівання фотоелектричних панелей над нормованою температурою у  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , є поширеним явищем, яке притаманне майже всьому періоду активної роботи фотоелектричних панелей з квітня по жовтень. В свою чергу перегрів викликає значні втрати генерації електричної енергії, і як наслідок призводить до зниження ККД.

Моделювання теплових процесів роботи фотоелектричних панелей з запропонованим пристроєм для реалізації методу підвищення ефективності використання фотоелектричних панелей шляхом перетворення їх у гібридний колектор показало, що розподіл температури між поверхнею кремнієвих елементів та теплоносієм є досить рівномірним і дозволяє досить ефективно охолоджувати панелі при заданих температурах теплоносія, проведений експеримент підтвердив дані результати.

4. Запропонована конструкція пристрою для реалізації методу підвищення коефіцієнта корисної дії фотоелектричних панелей за рахунок їхнього перетворення на гібридний колектор є економічно доцільною та конкурентоспроможною у порівнянні з існуючими на ринку аналогами. Основна перевага запропонованої технології полягає не лише у підвищенні ефективності використання сонячної енергії шляхом одночасного виробництва електричної та теплової енергії, а і у зменшенні ризику деградації продуктивності фотоелектричних панелей. Це досягається завдяки більш сприятливому температурному режиму роботи напівпровідникових елементів, що збільшує їхній термін експлуатації.

Фінансовий аналіз показав, що проєкт, який передбачає використання 104 монокристалічних панелей, може окупити себе за 9,5 років за поточних ринкових умов і без урахування інфляційних чинників. Проте цей розрахунок не включає витрати на будівництво системи водопостачання, необхідної для функціонування гібридного колектора.

Додатково була проведена порівняльна оцінка двох конструкцій гібридних колекторів. Виявлено, що запропонована конструкція має у 2 рази меншу питому вартість 1 кВт·год виробленої енергії порівняно з існуючими рішеннями, що свідчить про її високу економічну ефективність. Водночас розраховані значення генерації теплової енергії базуються на теоретичних моделях і не враховують можливі втрати внаслідок реальних умов експлуатації (наприклад, кліматичні особливості, забруднення поверхонь, деградація матеріалів тощо). Це може призвести до ще більшої економічної переваги запропонованої конструкції, оскільки в реальних умовах ефективність традиційних систем може виявитися нижчою, ніж передбачалося у розрахунках.

Таким чином, впровадження даної конструкції дозволить не лише підвищити ефективність використання сонячної енергії, а й значно знизити експлуатаційні витрати, що є ключовим фактором для широкого комерційного застосування гібридних сонячних систем.

5. Отримані в роботі наукові результати впроваджено в ТОВ «ТК ПРОЕКТ», де отримані моделі оцінки ефективності роботи фотоелектричних панелей дозволили проводити більш точні розрахунки обсягів генерованої енергії при виконанні проєктів з відновлювальної енергетики, в ТОВ «Південна енергетична компанія» використовуються результати дисертаційного дослідження для оцінки економічних та енергетичних показників проєктів геліоенергетики. Результати та матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту зокрема при викладанні дисциплін «Енергетичні системи та комплекси», «Енергозбереження будівель та споруд», «Енергозберігаючі режими та технології», а також використовуються при формуванні тем кваліфікаційних робіт здобувачів та конкурсних студентських наукових робіт.

Результати дисертаційної роботи були впроваджені при виконанні науково-дослідницьких робіт на тему: «Розроблення проєктних рішень з будівництва та приєднання фотоелектричних станцій», а також «Обґрунтування та розроблення системи внутрішнього електропостачання і комерційного обліку електроенергії адміністративної будівлі за адресою м. Одеса, вул. Академіка Глушко, 27 з застосуванням фотоелектричної станції».

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Al-Waeli, Ali HA, et al. «Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77 (2017): 109-130.
2. Alzaabi, Amna A., et al. "Electrical/thermal performance of hybrid PV/T system in Sharjah, UAE." *International Journal of Smart Grid and Clean Energy* 3.4 (2014): 385-389.
3. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2001 *ASHRAE Handbook fundamentals* Atlanta, GA 30329
4. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2009 *ASHRAE Handbook fundamentals* Atlanta, GA 30329  
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
5. AyGegül TaGçJoLlu, Onur TaGkIn, and Ali Vardar «A Power Case Study for Monocrystalline and Polycrystalline Solar Panels in Bursa City, Turkey,» *International Journal of Photoenergy*, 2016 <https://doi.org/10.1155/2016/7324138>
6. Benmenni, Mouhoub. «Особливості проектування фотоелектричних станцій, що розміщуються на дахах та стінах будівель.» *Vidnovluvana energetika* № 3 (50). 2017. с 41-47.
7. Charalambous, P. G., et al. "Optimization of the photovoltaic thermal (PV/T) collector absorber." *Solar energy* 85.5 (2011): 871-880.
8. Chow TT, Hand JW, Strachan PA. Building-integrated photovoltaic and thermal applications in a subtropical hotel building. *Appl Therm Eng* 2003;23(16): 2035-49;
9. Daghigh, R., Mohd Hafidz Ruslan, and Kamaruzzaman Sopian. "Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.8 (2011): 4156-4170.
10. Denysiuk S., «Guidelines of technological concepts of Smart Grid in power system,» *Power engineering: economics, technique, ecology*, vol. 1 (31), pp. 7–20, 2014.

11. Duffie J.A., Beckman W.A., Solar Engineering of Thermal Processes. *Fourth Edition*. 3, p. 910. 2013.
12. Garg HP, Adhikari RS. Conventional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors: steady-state simulation. *Renew Energy* 1997;11(3):363-85;
13. H. P. Garg, Goura Datta «Solar radiation. Fundamentals and characteristics of solar radiation». *Renewable Energy* Vol. 3. No 4/5. pp. 305-319. 1993.
14. Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Influence of temperature on energy performance indicators of hybrid solar panels using cylindrical cogeneration photovoltaic modules. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. P. 132-136. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569975>
15. Hussain, F., et al. "Design development and performance evaluation of photovoltaic/thermal (PV/T) air base solar collector." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25 (2013): 431-441.
16. Ismael A. I., Electrical energy analyses in monocrystal of solar cell systems [M.S. thesis], *Gazi University Institute of Science and Technology*, Ankara, Turkey, 2012.
17. Joshi, A. S., et al. "Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T)(glass-to-glass) system." *International Journal of Thermal Sciences* 48.1 (2009): 154-164.
18. Kalogirou, Soteris A., and Yiannis Tripanagnostopoulos. "Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production." *Energy conversion and management* 47.18-19 (2006): 3368-3382.
19. Kern Jr EC, Russell MC. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector system. In: *Proceedings of 13th IEEE photovoltaic specialist* 1978. p. 1153-7;
20. Kostić, Lj T., T. M. Pavlović, and Z. T. Pavlović. "Optimal design of orientation of PV/T collector with reflectors." *Applied Energy* 87.10 (2010): 3023-3029.

21. Kryvda V.I., Rudnitsky V.G., Suvorov, V.O. & Zubak, V.V. (2022). Improving the efficiency of solar panels when using mppt – controller. *Electrotechnic and Computer Systems*, (36 (112), 6-17. <https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.04>
22. Li, Zhaomeng, et al. "Experimental and numerical investigations on the performance of a G-PV/T system comparing with A-PV/T system." *Energy* 194 (2020): 116776.
23. Michael, Jee Joe, S. Iniyan, and Ranko Goic. "Flat plate solar photovoltaic–thermal (PV/T) systems: A reference guide." *Renewable and sustainable energy reviews* 51 (2015): 62-88.
24. Moradi, Kamran, M. Ali Ebadian, and Cheng-Xian Lin. "A review of PV/T technologies: Effects of control parameters." *International journal of heat and mass transfer* 64 (2013): 483-500.
25. Nogueira C. E. C., Bedin J., Niedzialkoski R. K, S. N. M. de Souza, and J. C. M. das Neves, "Performance of monocrystalline and polycrystalline solar panels in a water pumping system in Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 1610–1616, 2015
26. Otham MH, Yatim B, Sopian K, AbuBakar MN. Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and Fins. *Renew Energy* 2005;30:2005-17;
27. Othman, Mohd Yusof, et al. "Photovoltaic-thermal (PV/T) technology–the future energy technology." *Renewable energy* 49 (2013): 171-174.
28. Parida B., Iniyan S., and Goic R., «A review of solar photovoltaic technologies,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1625–1636, 2011.
29. Raghuraman P. Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal flat plate collector performance. *J Sol Energy Eng* 1981:103291-8;
30. Shahsavari A, Ameri M. Experimental investigation and modeling of a direct-coupled PV/T air collector. *Sol Energy* 2010;84:1938-58;

31. Sopian K, Liu HT, Kakac S, Veziroglu TN. Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying systems. *Energy Convers Manag* 2000;41:353-65;

32. Stolt L.. Proc. *9th Int. Photovoltaic Science and Engineering Conf.* (Niyazaki, Japan, Nov. 11–15, 1996) p. 139.

33. Sultan, Sakhr M., and MN Ervina Efzan. "Review on recent Photovoltaic/Thermal (PV/T) technology advances and applications." *Solar energy* 173 (2018): 939-954.

34. Tuttle J. R., Cole E.D, Ramanathan K.R., M. Contreras, J. Alleman, J. Keane, R. Noufi. Proc. *10th Sunshine Workshop on Thin Film Solar Cells* (Tokyo, Japan, Nov. 8–9, 1996) p. 139.

35. Tyagi, V. V., S. C. Kaushik, and S. K. Tyagi. "Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.3 (2012): 1383-1398.

36. Андропова, О. В., Курак, В. В., Дон, Н. Л. Моделювання роботи фотоелектричних панелей з використанням середовища MATLAB/Simulink. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, №3 (78), 2021 с.11-19.

37. Аях, Нсікак Іме. «Підвищення ефективності сонячного електропостачання для житлового будинку за допомогою водяного охолодження» Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2020.

38. Бабенко, О. В.; Василюк, Д. О. Використання фотовольтаїчних панелей для промислових споживачів. ВНТУ 2024.

39. Басок Б. І, Давиденко Б. В., Новіков В. Г., Сороковой Р. Я. Моделювання сонячного випромінювання для використання у відновлювальній енергетиці та в будівельній теплофізиці Промислова теплотехніка. 2018. № 1 с. 44-50

40. Бондарчук, А. С., Гоголюк О. П., Шулле Ю. А. Дослідження ефективності гібридних сонячних колекторів як джерела електричної та теплової енергії для житлового мікрорайону міста. *Genetics and biotechnology*.

41. Возняк О.Т., Янів М.Є. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Львів, 2010. № 664. С. 7–10.

42. Герега, С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», 2017. с. 202-202.

43. Головка А. В. Аналіз сонячних панелей. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 2021, с. 22-23.

44. Данильченко Д. О. Зелена енергетика як ключовий елемент впровадження концепції розподіленої генерації. *Electrical Engineering and Power Engineering* № 4, 2023 с. 32-43.

45. Діхтяренко Б. Р., Скурский М. С. Методи оцінки параметрів деградації сонячних панелей. Київ : КПІ ім. Сікорського, 2020. с. 416–418.

46. Дубровська В. Шкляр В. Гавриленко Є. Аналіз ефективності використання геліосистем на базі фотоелектричних модулів та сонячних колекторів для енергозабезпечення бюджетних об'єктів. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology* № 2, 2023.

47. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. [Електронний ресурс] URL: [https://ips.ligazakon.net/document/view/FN002747?an=1&ed=2013\\_07\\_24](https://ips.ligazakon.net/document/view/FN002747?an=1&ed=2013_07_24) Дата звернення: 10.02.2025 р.

48. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» [Електронний ресурс] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> Дата звернення: 10.02.2025 р.

49. Закон України «Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання» [Електронний ресурс] URL:

<https://ukc.gov.ua/knowledge/dozvil-na-vstanovlennya-lichylnyka-tepla-na-kvartyru/> Дата звернення: 10.02.2025 р.

50. Захаров Д. В., Книш Л. І. Математичне моделювання впливу температурного режиму на ефективність сонячної панелі. Дніпро : Дніпропетровський національний університет ім. Олеса Гончара, 2022. с. 48–58.

51. Звітна документація Міської дитячої лікарні № 3 розміщена Одеською міською радою [Електронний ресурс] URL: <https://drive.google.com/drive/folders/13icW8SAV8e9QWtIYREU-quo67EQgdi4P?usp=sharing>

52. Качан Ю.Г., Кузнецов В.В. Щодо практичного застосування відновлюваних джерел енергії в системах живлення нетягових споживачів. Гірнична електромеханіка та автоматика. науково-технічний збірник. № 102. 2019. С.21-25.

53. Кириленко О. В. Проблеми інтеграції відновлюваних джерел електроенергії в «слабкі» електричні мережі. Технічна електродинаміка № 3. 2012. с. 25–26.

54. 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>

55. Климчук О.А., Лужанська Г.В., Кандєєва В.В., Аксьонова І.В., Борохов І.В. Шляхи підвищення енергоефективності роботи тепломасообмінних установок систем низькотемпературного комбінованого опалення при використанні альтернативних джерел енергії. Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/naukovyj-visnyk-tdatu-2021-vypusk-11-tom-2.pdf>. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-33 , с 375-384

56. Конончук М. О. Моделювання процесів рекомбінації в напівпровідникових сполуках Відокремлений структурний підрозділ "Класичний фаховий коледж Сумського державного університету, 2023. 28 с.

57. Коренга В. Д. Сонячні електростанції баштового типу з центральним приймачем. 79 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті», 2013, с. 295-296.

58. Лежнюк П. Д. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах : монографія [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 204 с. 94.

59. Лежнюк П. Д. Вплив ВДЕ на втрати активної потужності в ЛЕС Техніка, енергетика, транспорт АПК. – № 3 (92). 2015. с. 84-90.

60. Лежнюк П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ Енергетика: економіка технології, екологія – 2015. №3(51) с.7-13

61. Лежнюк П.Д. Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії в ЛЕС. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. № 2. 2015 с. 134-135

62. Лисенко Л. І., «Фактори впливу на ефективність сонячних колекторів та фотоелектричних панелей в Харківській області.» Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність № 59 2013 с. 101-111.

63. Матях С. В., Суржик Т. В., Резцов В. Ф., Іванчук В. Ю., «Напрями та перспективи розвитку сонячної теплоенергетики», Відновлювана енергетика, № 3, с. 17–22, 2021, [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.3\(66\).33-44](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.3(66).33-44)»

64. 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>

65. Мисак, С. Й., Шаповал С. П., Гивлюд А. М. Моделювання теплової ефективності гібридного геліоколектора в системі із тепловим акумулятором. Науковий вісник НЛТУ України №3 (34) 2024 с. 96-102.

66. Мушкет, К. Я. «Визначення ефективності сонячних елементів» XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 15-16 травня 2019 р., м. Київ, Україна : збірник праць / КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. с. 269–272.

67. Нечепоренко О. О. Залежність ефективності сонячних панелей від температури навколишнього середовища. Київ : Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, 2019. с. 574–575.

68. Панов Л. І. Луценко Ю. Ю. Моделювання параметрів елемента сонячних панелей. Біомедична інженерія та електроніка № 4 (18), 2017.

69. Панченко, В. В., Харін Р. О. Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті № 3(28), 2023 с. 73-82.

70. Плакіда Я. С. «Підвищення ефективності та надійності автономних сонячних електростанцій.» The 7 th International scientific and practical conference “Modern research in world science”(October 2-4, 2022) SPC “Sci-conf. com. ua”, Lviv, Ukraine. 2022. 1320 p.

71. Позігун С. Перспективи розвитку сонячної енергетики в світі та в Україні: використання пристроїв сонячної енергетики для автономного живлення енергією систем розвідки та зв'язку. Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України., 2020, 82.1: с. 270-285.

72. Потапенко М. В., Шаршонь В. Л. Математичне моделювання плоского сонячного колектора для теплиць. The 2nd International scientific and practical conference “Young scientists and methods of improving modern theories”(September 26–29, 2023) Milan, Italy. International Science Group, 2023.

73. Пришляк, Ю., Шаповал, С., Іванишин, Ф. Гібридні сонячні колектори, що інтегровані у світлопрозорі фасади будівель. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Екологічна безпека держави», с. 67-69.

74. Рибченко, Л. С.; Ревера, Т. О. Сумарна сонячна радіація та альbedo підстильної поверхні в Україні. Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту, 2011.

75. Рибченко, Л. С.; Савчук, С. В. Потенціал геліоенергетичних кліматичних ресурсів сонячної радіації в Україні. Український географічний журнал, 2015, № 4 с. 16-23.

76. Романов, А. А. «Оцінка ефективності використання сонячних панелей в умовах житлового фонду міста». Сумський державний університет, 2017.

77. Руденко О. В. Дослідження плівкових сонячних перетворювачів Харків. нац. ун-т радіоелектроніки, 2020. 96 с.

78. Русу О. П., Гай Д. О., Устенко, А. Ю. Використання сонячних колекторів у системах обігріву приміщень. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. № 4 2018 с. 26-33.

79. Слабінога, М. О., «Розроблення програмного забезпечення для дослідження зміни потужності сонячних панелей від кута падіння променів.» Методи та прилади контролю якості № 2. 2018 с. 113-119.

80. Тарифи на газ для населення [Електронний ресурс] URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/gas/2024-06-01/> Дата звернення: 10.02.2025 р.

81. Тарифи на передачу електроенергії для підприємств [Електронний ресурс] URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/trans/> Дата звернення: 10.02.2025 р.

82. Тарифи на природні газ для підприємств [Електронний ресурс] URL: <https://index.minfin.com.ua/tariff/gas/prom/> Дата звернення: 10.02.2025 р.

83. Тарифи на природні електричну енергію для підприємств [Електронний ресурс] URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/>  
Дата звернення: 10.02.2025 р.

84. Тарифи на розподіл електроенергії для підприємств [Електронний ресурс] URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/prom/distr/> Дата звернення: 10.02.2025 р.

85. Трихлеб А. С., Панасюк І. В. Дослідження процесу відновлення деградованих сонячних панелей. Київ : КНУ технологій та дизайну, 2022. С. 27–34.

86. Урядова програма Програма «ГрінДІМ» від Держенергоефективності [Електронний ресурс] URL: <https://eefund.org.ua/greendim/> Дата звернення: 10.02.2025 р.

87. Федорчук С. О., Немировський І. А. Моделювання гібридної системи генерації на відновлювальних джерелах енергії для аналізу енергопостачання споживачів, 2017.

88. Фреїк, Д. М., В. В. Прокопів, У. М. Писклинець. Термодинамічний пр-перехід у кристалах телуриду кадмію. Фізика і хімія твердого тіла 2002 с. 58-61.

89. Хоховський А."Дослідження динамічних характеристик фотоелектричних панелей різних видів. Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research № 24, 2020 с. 83-94.

90. Хрипко, С. Л. Кідалов В. В. Сонячні батареї створенні на основі низько-розмірних наноконкомпозитних структур. Журнал нано-та електронної фізики № 4 (2) 2016

91. 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.

92. 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.

93. Шабовта М. Ю., Разінков В. О., «Оцінка енергетичних, температурних та економічних характеристик гібридних колекторів». Електротехнічні та комп'ютерні системи. № 36 (112), с.18-26. 2022.

94. Шаварський В., Тиш Є. Основні поняття систем перетворювачів сонячної енергії. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2022. с. 98.

95. Шаповал Степан, Енергоефективні гібридні сонячні колектори інтегровані у світлопрозорі конструкції будівель. Технічні науки та технології № 3 (37) 2024 с. 217-227.

96. Шаповал, В. С. «Вплив факторів наколишнього середовища на ефективність роботи сонячних панелей.» Наукові розробки молоді на сучасному етапі. Київський національний університет технологій та дизайну, 2019.

97. Шаповал, С. П., Возняк. О. Т. «Математичне моделювання Надходження сонячної енергії на потрійно-орієнтовану систему сонячних колекторів.» Науковий вісник НЛТУ України 2010 с. 313-316.

98. Юрченко Є. Л. «Вибір оптимальних параметрів орієнтації сонячних панелей.» Український журнал будівництва та архітектури № 4 (022) 2024 с. 155-160.

## ДОДАТОК А

Документи про впровадження результатів дослідження



### ДОВІДКА

Про використання результатів дисертаційної роботи

**Разінкова Владислава Олексійовича**

представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Надана довідка затверджує, що результати дисертаційного дослідження Разінкова В. О. «Методи та засоби підвищення коефіцієнту корисної дії сонячних фотоелектричних панелей» були впроваджені при виконанні науково-дослідницької роботи №1878-55 на тему: «Розроблення проектних рішень з будівництва та приєднання фотоелектричних станцій», яка була виконана у 2023 році, а також у науково-дослідницькій роботі №1871-55 на тему «Обґрунтування та розроблення системи внутрішнього електропостачання і комерційного обліку електроенергії адміністративної будівлі за адресою м. Одеса, вул. Академіка Глушко, 27 з застосуванням фотоелектричної станції», яка була виконана у 2022 р.

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Перший проректор



Сергій НЕСТЕРЕНКО



### ДОВІДКА

Про використання результатів дисертаційної роботи  
**Разінкова Владислава Олексійовича**  
 представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю  
 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційної дослідження Разінкова В. О. «Методи та засоби підвищення коефіцієнту корисної дії сонячних фотоелектричних панелей» використовуються Національним університетом «Одеська політехніка» при підготовці бакалаврів за освітньою програмою «Електропостачання та енергетичний менеджмент» в Навчально-науковому інституті електротехніки та електромеханіки (ННІЕЕ) на кафедрі «Електропостачання та енергетичного менеджменту» при викладанні наступних дисциплін

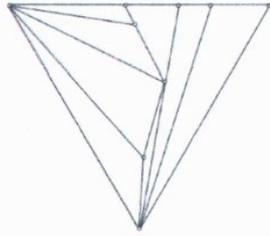
- Енергетичні системи та комплекси;
- Енергозбереження будівель та споруд;
- Енергозберігаючі режими та технології.

Довідка надана у зв'язку з захистом дисертації.

Перший проректор



Сергій НЕСТЕРЕНКО



**ТОВ ТК ПРОЕКТ**  
ПРОЕКТНЕ РІШЕННЯ РІЗНОЇ СКЛАДНОСТІ

ТОВ «ТК ПРОЕКТ»

Код ЄДРПОУ 42074132 ІПН 420741315520

Юридична адреса:

65017, м. Одеса, вул. Маршала Бабаджання, 20

Банківські реквізити:

Р/р UA063805820000026006010325258

МФО 380582

в АТ «МІЖНАРОДНИЙ ІНВЕСТИЦІЙНИЙ БАНК» м. Київ

Пошта/E-mail: [tkproekt@ukr.net](mailto:tkproekt@ukr.net)

[www.tkproekt.com.ua](http://www.tkproekt.com.ua)

тел. моб: 097-714-65-74; 068-316-70-58

## ДОВІДКА

Про впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта

Національного університету «Одеська політехніка»

**Разінкова Владислава Олексійовича**

Методи та засоби підвищення коефіцієнту корисної дії сонячних фотоелектричних панелей

Довідка видана в тому, що у діяльності ТОВ «ТК ПРОЕКТ» використані результати, що отримані у дисертаційній роботі аспірантом кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Національного університету «Одеська політехніка» МОН України Разінковим Владиславом Олексійовичем, прийнято до впровадження рекомендації щодо підвищення аналізу ефективності сонячних електростанції різних типів та потужностей.

Запропоновані Разінковим Владиславом Олексійовичем моделі оцінки ефективності роботи сонячних фотоелектричних панелей дозволили підвищити точність та швидкість прогнозування генерації електричної енергії сонячними електростанціями та проводити більш точний розрахунок генерації електроенергії фотоелектричними панелями з врахуванням багатьох впливових факторів.

Очікуваний ефект має такі складові:

- підвищення точності прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними панелями;
- підвищення ефективності використання сонячних панелей за рахунок врахування на стадії проектування більшої кількості факторів, що впливають на роботу сонячних панелей.

Директор ТОВ «ТК ПРОЕКТ»



Владислав КРЕМІНСЬКИЙ

м. Одеса, 2025 р.



**ТОВ «Південна енергетична компанія»**  
 вул. Педагогічна, 2, офіс 1, Одеса, 65062, Україна  
 тел./факс: +38 0482 375 455

вул. Г. Кірпи, 2а, офіс 606, Київ, 03035, Україна  
 тел./факс: +38 044 238 07 03

**"South power company" LLC**  
 2, Pedagogicheskaya str., office 1, Odessa, 65062, Ukraine  
 phone/fax: +38 0482 375 455

2a, G. Kirpy str., office 606, Kyiv, 03035, Ukraine  
 phone/fax: +38 044 238 07 03

## ДОВІДКА

Про впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта

Національного університету «Одеська політехніка»

**Разінкова Владислава Олексійовича**

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Довідка видана в тому, що у діяльності ТОВ «Південна енергетична компанія» використані результати, що отримані у дисертаційній роботі аспірантом кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Національного університету «Одеська політехніка» МОН України Разінковим Владиславом Олексійовичем «Методи та засоби підвищення коефіцієнту корисної дії сонячних фотоелектричних панелей», прийнято до впровадження рекомендації щодо підвищення точності розрахунку генерації сонячними панелями в довільний момент часу та проведення економічної оцінки ефективності побудови об'єктів відновлювальної енергетики.

Відзначено нові науково-технічні можливості, які забезпечують отримані результати::

- можливість точного прогнозування генерації сонячних панелей в довільний момент часу з врахуванням багатьох факторів;
- надання більш точних прогнозованих термінів окупності та показників рентабельності проектів з відновлювальної енергетики.

ТОВ «Південна енергетична компанія» заплановано впровадження результатів наукової роботи Разінкова В. О. під час проектування нових об'єктів відновлювальної енергетики

Генеральний директор



**О. Є. Чеботарьова**

ДОДАТОК Б  
Список публікацій здобувача

Наукові праці в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1 В. О. Разінков, «Визначення інтенсивності сонячної радіації, як ключового фактора прогнозування роботи фотоелектричних панелей» Вісник ВПІ вип. 4, 2024. с. 47-53 (*Наукове фахове видання України (Категорія "Б")*).

URL:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53>

2 В. О. Разінков, В. В. Капалін, «Метод підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних панелей за рахунок перетворення їх у гібридний колектор», Електротехнічні та комп'ютерні системи вип. 41(117) с. 61-68 (*Наукове фахове видання України (Категорія "Б")*).

URL:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-47-53>

3 М. Ю. Шабовта, В. О. Разінков, «Оцінка енергетичних, температурних та економічних характеристик гібридних колекторів», Електричні та комп'ютерні системи №36 (112). 2022. с.18-26 (*Наукове фахове видання України (Категорія "Б")*).

URL:<https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.03>

4 В. О. Разінков, «Підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних електричних панелей за рахунок перетворення їх в гібридний колектор» Електричні та комп'ютерні системи №34 (110). 2021. с.34-38 (*Наукове фахове видання України (Категорія "Б")*).

URL:<https://doi.org/10.15276/eltecs.34.110.2021.4>

Опубліковані праці апробаційного характеру

5. В. О. Разінков, В. О. Суворов, «Перспективи використання геліоенергетики для енергопостачання в місті Одеса», Вісник ВПІ вип. 6. 2022 с. 29-36 (*Наукове фахове видання України (Категорія "Б")*).

URL:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-29-36>

6. В. О. Разінков, «Оглядовий аналіз основних видів сонячних елементів та виявлення шляхів підвищення їх ефективності роботи та застосування» Електронний журнал «Альманах науки». Вип. № 5 (26). 2019. с. 23-25.

7. Razinkov V. O. Generation of electricity by photovoltaic panels under conditions approximate to real. International Workshop of Scientific Students' Papers, 17<sup>th</sup> Edition. 2023.

URL: <https://elstud.webnode.ro/editii-elstud/2023/>

8. Разінков В. О., Разінков Н. О. Теплові процеси сонячних фотоелектричних панелей. X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)». 2023.

URL: <http://econference.nubip.edu.ua/index.php/pmeas/pmeas2023/index>

9. Разінков В. О. Волощук С. О. Дослідження факторів що впливають на генерацію сонячних панелей «Perspectives of contemporary science: theory and practice. Proceedings of the 11th International scientific and practical conference.» Lviv, Ukraine. 2024.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/12/PERSPECTIVES-OF-CONTEMPORARY-SCIENCE-THEORY-AND-PRACTICE-9-11.12.24.pdf>

Отримані патенти за темою дисертації

1 Патент України на корисну модель № 148479 «Пристрій для підвищення ефективності використання сонячних фотоелектричних модулів» зареєстровано 11.08.2021 р. дата публікації 11.08.2021 Бюл. № 32.

2 Патент України на корисну модель № 152350 «Пристрій для підвищення ККД сонячних панелей з покращеними характеристиками» зареєстровано 11.01.2023 р. дата публікації 11.01.2023 Бюл. № 2.