

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

на тему:

«Удосконалення фотоелектричної станції потужністю 10 кВт»

Виконав: студент 3 курсу,
групи НВДЕ-2023-1у
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(Нетрадиційні та відновлювальні джерела
енергії)



А. А. Ладика

Керівник



Т. М. Пугачова

Рецензент



Я.Б.Форкун

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра Альтернативної електроенергетики та електротехніки
Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри АЕЕ



канд. техн. наук., доцент **Олексій ЄГОРОВ**

“ ____ ” _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ

Ладика Анастасії Анатоліївни

1. Тема проєкту: «Удосконалення фотоелектричної станції потужністю 10 кВт»

керівник проєкту Пугачова Тетяна Миколаївна, канд. техн. наук, доцент
затверджені наказом вищого навчального закладу 22.05.2026 року
№ 440-03.

2. Строк подання студентом проєкту 15 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): фотоелектрична станція малої потужності, мережева / автономна / гібридна фотоелектрична станція, номінальна потужність інвертора - 10 кВт, вихідна напруга інвертора - 220/380 В, 50 Гц, режим роботи станції - цілорічний, з максимальною генерацією у весняно-літній період, основний напрям удосконалення - підвищення ефективності роботи станції.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналіз сучасного стану фотоелектричних систем. Класифікація сонячних електростанцій та їх конструктивні характеристик. Сучасні підходи до підвищення ефективності фотоелектричних систем. Технічні рішення щодо підвищення ефективності фотоелектричної станції потужністю 10 кВт. Охорона праці. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1) Схема сонячної електростанції. 2) Оптимальний кут нахилу ФЕП відносно сонця. 3) Типова схема функціонування сонячної станції 4) Блок-схема системи повороту сонячних батарей 5) Функціональна схема захисту сонячної батареї від перегріву

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розрахункова частина	Пугачова Т.М., доцент каф. АЕЕ		
Охорона праці	Серіков Я.О., доцент каф. ОП та БЖД		

7. Дата видачі завдання 11 травня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Енергія вітру та потенціал її використання	25.05.2026-30.05. 2026	
2	Вітроенергетичні вітроустановки та їх конструкція	31.05.2026-05.06. 2026	
3	Розрахунок ефективності застосування вітроенергетичної установки.	07.06.2026-10.06. 2026	
4	Розробка заходів з охорони праці.	03.06.2026-07.06. 2026	
5	Оформлення пояснювальної записки	08.06.2026-12.06. 2026	
6	Підготовка та подання дипломного проєкту до захисту.	11.06. 2026-14.06. 2026	

Студент



Ладика А. А.

Керівник роботи 

Пугачова Т.М.

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота складається з розрахунково-пояснювальної записки, виконаної машинописним способом на 88 аркушах формату А4, яка вміщує 5 розділи, 9 таблиць, 19 рис., перелік посилань 37 і 9 листів презентаційної частини.

Мета – полягає в розробці методів удосконалення фотоелектричних станцій для підвищення їх ефективності.

Об'єктом дослідження є фотоелектрична станція, що використовується для отримання електричної енергії. Мета роботи полягає в розробці методів удосконалення фотоелектричних станцій (ФЕС) для підвищення їх ефективності.

Головними завданнями роботи є: аналіз сучасного стану використання та конструкцій фотоелектричних станцій різних типів; З метою забезпечення оптимального функціонування та підтримки надійності ФЕС, важливо розробляти та впроваджувати заходи щодо для підвищення їх ефективності, які забезпечують постійний нагляд і контроль за їхньою роботою.

Розглянуто питання охорони праці.

Ключові слова: фотоелектрична станція, ефективність, сонячна енергетика, продуктивність.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ	8
1.1 Основні типи та технічні характеристики фотоелектричних перетворювачів	9
1.2. Екологічні аспекти та особливості виробництва сонячної електроенергії	14
2. КЛАСИФІКАЦІЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА ЇХ КОНСТРУКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	20
3. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ	32
3.1. Оцінка факторів, які визначають ефективність роботи фотоелектричних систем	32
3.2 Основні фактори, що впливають на роботу фотоелемента	51
4. ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ПОТУЖНІСТЮ 10 кВт	52
4.1. Обґрунтування кута нахилу фотоелектричних модулів	52
4.2. Технологія охолодження фотоелектричних панелей	64
5. ОХОРОНА ПРАЦІ	77
5.1. Фактори, що підлягають урахуванню при використанні захисних заходів з електробезпеки	77
ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ВСТУП

Сьогодні електрична енергія є одним із найважливіших ресурсів, без якого неможливе функціонування сучасного суспільства. Вона забезпечує комфортні умови життя населення та використовується практично в усіх сферах господарської діяльності. Водночас виробництво електроенергії традиційними методами стає дедалі дорожчим і негативно впливає на довкілля. Це пов'язано зі зростанням вартості викопних палив, зокрема нафти та природного газу, запаси яких є обмеженими. За таких умов особливої актуальності набуває використання відновлюваних джерел енергії, які характеризуються меншим впливом на навколишнє середовище та сприяють підвищенню екологічної безпеки.

Відновлювані джерела енергії мають вирішальне значення для скорочення викидів парникових газів та стримування процесів глобального потепління. Згідно з сучасними міжнародними цілями у сфері кліматичної політики, суттєве збільшення частки відновлюваної енергетики та підвищення рівня енергоефективності до 2030 року є одним із найбільш дієвих і економічно обґрунтованих шляхів переходу до сталого енергетичного розвитку. Реалізація цих заходів сприятиме досягненню цілей Паризької кліматичної угоди та зменшенню негативного впливу енергетичного сектору на навколишнє середовище.

Згідно з даними IRENA, у 2022 році світова відновлювана енергетика продемонструвала найвищі темпи приросту встановлених потужностей за всю історію спостережень, досягнувши близько 40 % від загальної встановленої потужності. Водночас розвиток відновлюваних джерел енергії залишається нерівномірним, що ускладнює реалізацію глобального енергетичного переходу та досягнення міжнародних кліматичних цілей.

Альтернативна енергетика охоплює технології виробництва електричної, теплової та механічної енергії з використанням відновлюваних природних ресурсів і мінімальним впливом на навколишнє середовище. До основних її напрямів належать сонячна, вітрова, гідроенергетика, геотермальна енергетика

та енергетика біомаси. Використання цих джерел енергії сприяє скороченню викидів шкідливих речовин і парникових газів, зменшенню залежності від традиційних паливно-енергетичних ресурсів, а також створює передумови для сталого економічного розвитку та підвищення енергетичної безпеки.

Сонячна енергія є важливим відновлюваним джерелом енергії, використання якого не призводить до викидів забруднювальних речовин і парникових газів. Перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію за допомогою фотоелектричних модулів забезпечує екологічно чистий спосіб енергозабезпечення. В Україні розвиток сонячної енергетики набуває дедалі більшої актуальності через необхідність диверсифікації джерел енергії, підвищення енергетичної незалежності та зменшення негативного впливу традиційної енергетики на довкілля.

Сонячна енергетика є одним із найбільш перспективних напрямів відновлюваної енергетики, що базується на використанні енергії сонячного випромінювання для виробництва електричної та теплової енергії. Вона знаходить широке застосування в системах електропостачання, опалення та гарячого водопостачання. Сонце є практично невичерпним джерелом енергії, доступним у більшості регіонів світу та безпечним для навколишнього середовища. Обсяги сонячної енергії, що надходять на поверхню Землі, значно перевищують світові потреби в енергетичних ресурсах. Важливою перевагою сонячної енергетики є відсутність викидів шкідливих речовин і парникових газів під час виробництва енергії, що сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля та забезпеченню сталого розвитку енергетики.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Фотоелектричні перетворювачі є основними елементами фотоелектричних систем, призначеними для безпосереднього перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. Основою їх роботи є сонячні елементи, виготовлені з напівпровідникових матеріалів, переважно кремнію. Під впливом сонячного світла в напівпровіднику виникає фотоелектричний ефект, у результаті якого генерується електричний струм.

Для отримання необхідної потужності окремі сонячні елементи об'єднують у фотоелектричні модулі, а модулі — у фотоелектричні установки та електростанції різної потужності. Сучасні фотоелектричні системи характеризуються достатньо високою ефективністю, а коефіцієнт корисної дії більшості комерційних сонячних модулів становить у середньому від 17 до 20 %, що забезпечує їх широке використання в енергетичній галузі.

Фотоелектричні системи характеризуються простотою конструкції та експлуатації, оскільки не містять рухомих механічних елементів. Це забезпечує високий рівень надійності, тривалий термін служби та мінімальні потреби в технічному обслуговуванні. Водночас сонячні елементи, що входять до складу фотоелектричних модулів, є складними напівпровідниковими пристроями, виготовлення яких потребує високоточного технологічного процесу, подібного до виробництва інтегральних мікросхем [1].

На рис. 1.1 наведено загальну конструкцію фотоелектричної панелі [1].

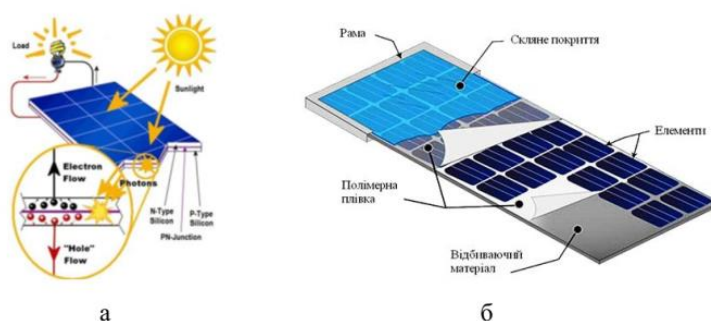


Рисунок 1.1 Принцип дії (а) та конструкція ФЕП (б)

1.1 Основні типи та технічні характеристики фотоелектричних перетворювачів

Сучасні фотоелектричні перетворювачі представлені кількома основними типами, кожен з яких відрізняється технологією виготовлення, конструктивними особливостями та експлуатаційними характеристиками. Найбільш поширеними є монокристалічні та полікристалічні кремнієві фотоелементи. Крім них, активно розвиваються тонкоплівкові, перовскітні, органічні, каскадні (тандемні) та концентраторні фотоелектричні перетворювачі. Кожен із зазначених типів має свої переваги та недоліки, що визначають сфери їх практичного застосування та перспективи подальшого розвитку.

На рис. 1.2 наведено зовнішній вигляд типових сонячних модулів.

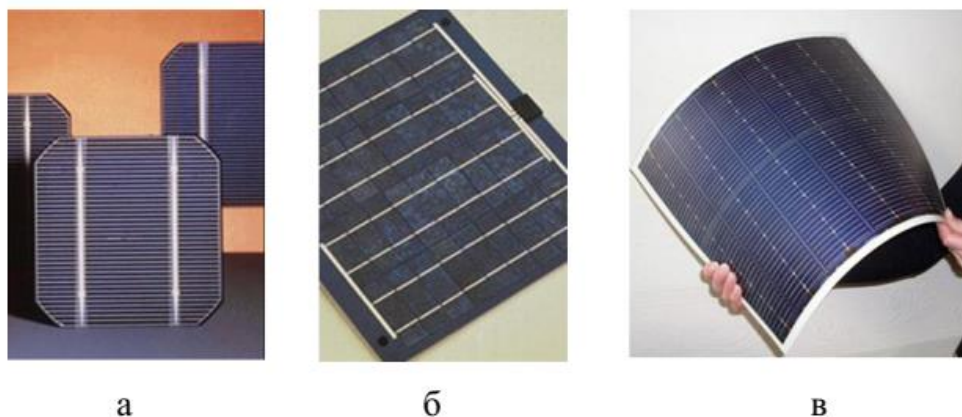


Рисунок 1.2 Монокристалічний (а), полікристалічний (б)
та плівковий (в) ФЕП

Монокристалічні кремнієві фотоелектричні перетворювачі є найбільш поширеним типом сонячних елементів завдяки високій ефективності та надійності. Вони виготовляються з високоочищеного монокристалічного кремнію, який має однорідну кристалічну структуру. Це забезпечує ефективне перетворення сонячної енергії на електричну, а коефіцієнт корисної дії сучасних монокристалічних модулів може досягати 25 %. Високі технічні

характеристики роблять їх придатними для застосування в умовах обмеженої площі встановлення.

Полікристалічні кремнієві фотоелектричні перетворювачі характеризуються простішою технологією виробництва та нижчою собівартістю порівняно з монокристалічними аналогами. Їх структура утворена множиною кремнієвих кристалів різної орієнтації, що призводить до певних втрат енергії під час перетворення сонячного випромінювання. Унаслідок цього коефіцієнт корисної дії таких елементів зазвичай не перевищує 20 %. Незважаючи на дещо нижчу ефективність, полікристалічні модулі залишаються популярним рішенням завдяки оптимальному співвідношенню вартості та продуктивності.

Тонкоплівкові фотоелектричні перетворювачі, до яких належать елементи на основі аморфного кремнію (a-Si), телуриду кадмію (CdTe) та диселеніду міді-індію-галію (CIGS), зазвичай мають нижчий коефіцієнт корисної дії порівняно з кремнієвими аналогами, який становить до 15 %. Водночас вони характеризуються малою масою, гнучкістю конструкції та можливістю монтажу на поверхнях різної форми, що значно розширює сфери їх застосування.

Перовскітні фотоелектричні перетворювачі належать до новітніх технологій сонячної енергетики та привертають значну увагу науковців завдяки високому потенціалу ефективності. За результатами сучасних досліджень їхній коефіцієнт корисної дії може досягати 30 %, при цьому технологія виготовлення залишається відносно простою та економічно вигідною. Поєднання високої ефективності та перспективи зниження вартості виробництва робить перовскітні фотоелектричні елементи одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сонячної енергетики.

Органічні фотоелектричні перетворювачі функціонують на основі органічних напівпровідникових матеріалів і відкривають широкі можливості для створення легких, гнучких та напівпрозорих сонячних елементів. Такі властивості дозволяють інтегрувати їх у будівельні конструкції, мобільні

пристрої та інші інноваційні системи. Водночас рівень їхньої ефективності поки що залишається порівняно невисоким, а коефіцієнт корисної дії зазвичай не перевищує 10 %.

Каскадні (тандемні) фотоелектричні перетворювачі складаються з декількох шарів напівпровідникових матеріалів із різними характеристиками поглинання світла. Така конструкція забезпечує більш повне використання сонячного спектра та дозволяє суттєво підвищити ефективність перетворення сонячної енергії в електричну. Завдяки цьому коефіцієнт корисної дії тандемних фотоелементів може перевищувати 40 %, що робить їх одним із найперспективніших напрямів розвитку сучасної фотоелектричної техніки.

Концентраторні фотоелектричні перетворювачі використовують спеціальні оптичні системи, зокрема лінзи або дзеркала, для концентрації сонячного випромінювання на невеликій площі високоефективних фотоелементів. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити витрати дорогих напівпровідникових матеріалів і водночас підвищити ефективність перетворення сонячної енергії в електричну [3].

Порівняльні характеристики основних типів фотоелектричних перетворювачів наведено в таблиці 1.1 [2].

До найважливіших параметрів, що визначають ефективність і доцільність використання фотоелектричних перетворювачів, належать коефіцієнт корисної дії, спектральна чутливість, температурна стабільність, рівень деградації характеристик у процесі експлуатації та економічні показники, зокрема вартість виготовлення й впровадження.

Коефіцієнт корисної дії є одним із головних показників ефективності фотоелектричних перетворювачів і характеризує частку сонячної енергії, яка перетворюється на електричну. Спектральна чутливість визначає здатність фотоелемента поглинати та ефективно використовувати сонячне випромінювання в різних діапазонах довжин хвиль. Температурний коефіцієнт відображає вплив температури на робочі характеристики фотоелектричного

перетворювача та показує зміну його ефективності в процесі нагрівання або охолодження.

Важливою характеристикою також є деградація фотоелектричних перетворювачів, яка проявляється у поступовому зниженні їхньої продуктивності протягом експлуатації. Оцінка темпів деградації дозволяє прогнозувати термін служби обладнання, визначати економічну доцільність його використання та оцінювати довгострокову ефективність фотоелектричних систем [4].

Таблиця 1.1 Типи фотоелектричних елементів

Тип елементу	Ефективність	Переваги	Недоліки
Полікристалічні (p-Si)	~15%	Низька ціна	Чутливий до підвищених температур; скорочений термін експлуатації
Монокристалічні (Mono-Si)	~20%	Висока продуктивність; адаптовано для комерційного застосування; тривалий термін експлуатації.	Висока вартість
Концентровані (CVP)	~41%	Надзвичайно висока продуктивність та ефективність.	Необхідний сонячний трекер та система охолодження для забезпечення високої ефективності
Тонкоплівкові з аморфного кремнію (a-Si)	~7-10%	Відносно низька вартість; простий у виробництві та гнучкий	Не високі гарантії та термін служби

Вартість фотоелектричних перетворювачів є одним із визначальних критеріїв при виборі технології для створення фотоелектричної системи. Вона залежить від типу використовуваних матеріалів, складності технологічного процесу виготовлення, рівня розвитку виробництва та його масштабів. Економічна доступність фотоелектричних модулів значною мірою впливає на конкурентоспроможність і темпи впровадження сонячних енергетичних технологій.

Під час проєктування фотоелектричних систем необхідно комплексно враховувати технічні характеристики фотоелектричних перетворювачів, умови їх експлуатації, довговічність, надійність та економічні показники. Такий підхід дозволяє обрати найбільш ефективне й економічно обґрунтоване технічне рішення для конкретних умов використання [5].

Сучасні тенденції розвитку фотоелектричних технологій спрямовані на підвищення ефективності перетворення сонячної енергії, зниження собівартості виробництва, збільшення терміну експлуатації та розширення сфер застосування фотоелектричних систем. Особливу увагу науковців привертають перовскітні та органічні фотоелектричні перетворювачі, які мають значний потенціал для створення високоефективних і водночас економічно доступних сонячних елементів.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сонячної енергетики є створення концентраторних і каскадних (тандемних) фотоелектричних перетворювачів. Завдяки використанню сучасних конструктивних рішень такі системи забезпечують високі показники ефективності перетворення сонячної енергії та дозволяють зменшити витрати дорогих напівпровідникових матеріалів.

Важливою тенденцією останніх років є інтеграція фотоелектричних модулів у будівлі та споруди (BIPV), а також їх використання в транспортних засобах. Такий підхід розширює можливості застосування сонячної енергетики в міському середовищі, сприяє підвищенню енергоефективності інфраструктури та зменшенню споживання традиційних енергоресурсів [6].

Не менш важливим напрямом розвитку є вдосконалення технологій накопичення енергії. Використання сучасних акумуляторних і водневих систем дозволяє ефективніше зберігати та використовувати електроенергію, вироблену фотоелектричними установками, що підвищує надійність їх роботи та забезпечує більш стабільне енергопостачання.

Суттєвий вплив на розвиток галузі має державна підтримка, що реалізується через економічні стимули, нормативно-правове регулювання та програми розвитку відновлюваної енергетики. Такі заходи сприяють збільшенню обсягів використання фотоелектричних систем і залученню інвестицій у галузь.

Завдяки екологічності, відновлюваному характеру енергетичного ресурсу та постійному вдосконаленню технологій фотоелектричні системи є одним із ключових елементів переходу до сталої енергетики та важливим інструментом скорочення викидів парникових газів і протидії глобальним кліматичним змінам [7].

1.2. Екологічні аспекти та особливості виробництва сонячної електроенергії

Основними елементами сонячних батарей є фотоелектричні елементи, які являють собою напівпровідникові пристрої, здатні безпосередньо перетворювати енергію сонячного випромінювання на електричну (Фреїк, 2012). Найпоширенішим матеріалом для їх виготовлення є кремній, який завдяки доступності, надійності та економічній доцільності займає близько 80 % світового ринку фотоелектричних технологій. Поряд із кремнієвими елементами застосовуються також тонкоплівкові технології на основі органічних матеріалів, а також сполук рідкісних хімічних елементів (Головко, 2021).

Для виробництва окремих типів фотоелектричних перетворювачів використовують такі елементи, як кадмій, галій, германій та миш'як.

Незважаючи на їх високі електротехнічні характеристики, ці речовини можуть становити потенційну небезпеку для здоров'я людини та навколишнього середовища у разі порушення технологій виробництва, експлуатації або утилізації сонячних модулів. Тому питання екологічної безпеки та належної переробки відпрацьованих фотоелектричних панелей набувають дедалі більшого значення.

Негативний вплив сонячних батарей на навколишнє середовище переважно пов'язаний із використанням окремих токсичних речовин у процесі їх виробництва, а також з особливостями утилізації відпрацьованих фотоелектричних модулів. Екологічна безпека фотоелектричних технологій значною мірою залежить від дотримання технологічних норм під час виготовлення, експлуатації та переробки сонячних панелей.

Особливу увагу необхідно приділяти запобіганню викидам шкідливих і потенційно канцерогенних речовин на підприємствах, що виробляють фотоелементи. Недотримання екологічних вимог може призвести до забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів, що становить загрозу для здоров'я людини та природних екосистем.

Після завершення терміну експлуатації сонячні панелі повинні проходити спеціалізовану переробку або утилізацію на підприємствах, які мають відповідні технології та дозвільну документацію для поводження з фотоелектричними відходами. Належна система збору та переробки відпрацьованих модулів дозволяє мінімізувати їхній негативний вплив на довкілля та забезпечує повторне використання цінних матеріалів у виробництві нових фотоелектричних систем.

Сонячні панелі та фотоелектричні модулі можуть містити незначні кількості потенційно небезпечних для довкілля речовин, зокрема свинцю, кадмію, селену та інших хімічних елементів. У разі неналежної утилізації або порушення технологій поводження з відпрацьованими модулями ці речовини можуть становити екологічну загрозу. Саме тому важливе значення має організація ефективної системи збору та переробки фотоелектричних відходів.

Сучасні технології переробки дозволяють відновлювати до 90 % скла та до 95 % напівпровідникових матеріалів, що можуть бути повторно використані у виробництві нових фотоелектричних модулів.

Водночас виробництво електроенергії за допомогою сонячних електростанцій має суттєві екологічні переваги порівняно з традиційними джерелами генерації. Використання сонячної енергії сприяє скороченню викидів парникових газів та забруднювальних речовин в атмосферу, характерних для теплових електростанцій. У процесі експлуатації сонячні електростанції практично не впливають на хімічний склад атмосферного повітря та не створюють значних екологічних ризиків.

За певних погодних умов на елементах електричних мереж сонячних електростанцій можуть виникати коронні розряди, які супроводжуються утворенням незначних кількостей озону. Проте їх вплив на стан атмосферного повітря є локальним і не має істотного екологічного значення. Таким чином, за умови дотримання вимог щодо виробництва, експлуатації та утилізації обладнання сонячна енергетика залишається одним із найбільш екологічно безпечних способів виробництва електроенергії.

Генерація та передача електричної енергії сонячними електростанціями не потребує використання значних обсягів водних ресурсів, що сприяє збереженню природних гідрологічних і гідробіологічних режимів поверхневих та підземних вод. У процесі експлуатації основне обладнання сонячних електростанцій, зокрема фотоелектричні модулі, інвертори, силові шафи та трансформаторні підстанції, не є джерелами викидів забруднювальних речовин в атмосферу, не спричиняють забруднення земельних і водних ресурсів та не мають істотного впливу на ландшафти, рослинний і тваринний світ. Крім того, функціонування сонячних електростанцій практично не впливає на соціальне та техногенне середовище.

Основними джерелами електромагнітних полів на фотоелектричній станції є силові трансформатори, розподільчі пристрої трансформаторних підстанцій та кабельні лінії електропередачі, призначені для передачі

виробленої електроенергії. Рівні електромагнітного випромінювання від зазначеного обладнання регламентуються чинними нормативними документами та повинні відповідати встановленим санітарним вимогам.

З огляду на відносно невеликі рівні електромагнітного випромінювання та дотримання нормативних вимог під час проєктування й експлуатації обладнання, вплив фотоелектричних станцій на населення та навколишнє середовище вважається незначним і не становить загрози для здоров'я людини.

За умови дотримання вимог щодо проєктування, будівництва та експлуатації фотоелектричної станції істотного негативного впливу на рослинний і тваринний світ прилеглих територій не очікується. У порівнянні з традиційними джерелами генерації електроенергії сонячні електростанції характеризуються мінімальним впливом на навколишнє середовище та мають низку екологічних і техніко-економічних переваг.

До основних переваг сонячних електростанцій належать:

1. Висока надійність обладнання. Фотоелектричні модулі не містять рухомих механічних частин, що значно знижує ймовірність виникнення несправностей та забезпечує стабільну роботу системи.
2. Тривалий термін експлуатації. Сучасні сонячні панелі здатні ефективно працювати протягом 25–30 років і більше, зберігаючи високий рівень продуктивності протягом усього терміну служби.
3. Підвищення енергетичної незалежності. Фотоелектричні системи дозволяють частково або повністю забезпечувати власні потреби в електроенергії та зменшувати залежність від зовнішніх джерел електропостачання.
4. Відсутність потреби у паливі. Для виробництва електроенергії сонячні електростанції використовують енергію сонячного випромінювання, що виключає витрати на придбання, транспортування та зберігання палива.
5. Низький рівень шуму. У процесі роботи фотоелектричні модулі практично не створюють шумового навантаження, що є важливою перевагою порівняно з деякими іншими видами відновлюваної енергетики.

6. Економічна ефективність у довгостроковій перспективі. Після окупності початкових інвестицій витрати на виробництво електроенергії є мінімальними, що забезпечує економічну доцільність використання сонячних електростанцій.

Завдяки зазначеним перевагам сонячна енергетика розглядається як один із найбільш перспективних напрямів розвитку відновлюваних джерел енергії та важливий інструмент забезпечення сталого енергетичного розвитку.

Незважаючи на численні переваги, використання сонячної енергії має певні технічні, економічні та екологічні обмеження.

До основних недоліків сонячної енергетики належать:

1. Використання потенційно небезпечних матеріалів. У складі окремих типів фотоелектричних модулів можуть використовуватися токсичні речовини та хімічні елементи, що потребують дотримання спеціальних вимог під час виробництва, експлуатації та утилізації обладнання.

2. Порівняно невисока питома потужність. Кількість електроенергії, яку можуть виробляти сонячні панелі з одиниці площі, є обмеженою. Для забезпечення значних обсягів генерації електроенергії необхідні великі площі розміщення фотоелектричних модулів.

3. Значні початкові капіталовкладення. Встановлення сонячної електростанції потребує суттєвих інвестицій у фотоелектричні модулі, інверторне обладнання, системи кріплення та монтажні роботи. У зв'язку з цим термін окупності проекту може бути досить тривалим.

4. Залежність від погодних умов і сонячної активності. Ефективність роботи фотоелектричних систем визначається рівнем сонячної радіації та знижується в умовах хмарності, туману, опадів, а також у зимовий період через скорочення тривалості світлового дня.

5. Необхідність використання систем накопичення енергії. Через нерівномірний характер генерації електроенергії часто виникає потреба у встановленні акумуляторних систем або використанні резервних джерел живлення для забезпечення безперебійного електропостачання.

Незважаючи на зазначені недоліки, постійне вдосконалення фотоелектричних технологій, зниження вартості обладнання та розвиток систем накопичення енергії поступово підвищують ефективність і конкурентоспроможність сонячної енергетики.

Отже, пряме перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію за допомогою фотоелектричних перетворювачів є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасної енергетики. Сонячні електростанції забезпечують виробництво електроенергії без спалювання викопного палива, що дозволяє суттєво скоротити викиди парникових газів та інших забруднювальних речовин в атмосферу.

Порівняно з традиційними тепловими електростанціями сонячна енергетика характеризується значно меншим впливом на навколишнє середовище, сприяє збереженню природних ресурсів і підвищенню рівня екологічної безпеки. Незважаючи на окремі технічні та економічні обмеження, постійне вдосконалення фотоелектричних технологій, зростання їх ефективності та зниження вартості обладнання створюють передумови для подальшого широкого впровадження сонячної енергетики як важливої складової сталого енергетичного розвитку.

2. КЛАСИФІКАЦІЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА ЇХ КОНСТРУКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Сонячні електростанції являють собою складні енергетичні комплекси, призначені для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію. Конструкція та принцип роботи таких станцій залежать від технології, що використовується для перетворення сонячної енергії. Від обраної технології також залежать ефективність роботи станції, її технічні характеристики та сфери застосування.

За принципом перетворення сонячної енергії сонячні електростанції поділяються на два основних типи: фотоелектричні та термодинамічні (концентраційні).

Фотоелектричні (фотовольтаїчні) електростанції здійснюють безпосереднє перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію за допомогою фотоелектричних модулів. Завдяки простоті конструкції, високій надійності та можливості використання в системах різної потужності цей тип станцій є найбільш поширеним у сучасній сонячній енергетиці.

Термодинамічні (концентраційні) сонячні електростанції працюють за іншим принципом. Спочатку сонячне випромінювання концентрується за допомогою дзеркал або інших оптичних систем і перетворюється на теплову енергію. Отримане тепло використовується для нагрівання робочого середовища та виробництва пари, яка приводить у дію турбіну, з'єднану з електрогенератором. Такі станції здатні забезпечувати великі обсяги генерації електроенергії та можуть поєднуватися із системами акумулювання теплової енергії.

Європейський ринок сонячної енергетики характеризується значною різноманітністю технічних рішень і масштабів реалізації проєктів — від невеликих побутових фотоелектричних установок до потужних промислових сонячних електростанцій. Залежно від особливостей конструкції та місця

встановлення сонячні електростанції поділяються на декілька основних сегментів, характеристику яких наведено в таблиці 2.1.

Наземні сонячні електростанції є найбільш поширеним типом комерційних фотоелектричних систем. Вони розміщуються на спеціально відведених земельних ділянках і забезпечують ефективне використання території для виробництва електричної енергії. Такий спосіб встановлення дозволяє оптимально орієнтувати сонячні модулі відносно Сонця, що сприяє підвищенню продуктивності електростанції та економічної ефективності її експлуатації.

До складу наземної сонячної електростанції входять фотоелектричні модулі, опорні конструкції, інверторне обладнання, трансформаторні підстанції, кабельні мережі та інші допоміжні системи. Усе обладнання розташовується безпосередньо на території об'єкта, що спрощує його обслуговування та забезпечує можливість створення електростанцій значної потужності (рис. 2.1).

Таблиця 2.1. Типи сонячних електростанцій

Типи сонячних електростанцій	Опис
Наземні сонячні електростанції	Встановлюються на відкритих земельних ділянках, що дозволяє використовувати великі площі для розміщення сонячних панелей.
Дахові сонячні електростанції	Монтуються на відкритих земельних ділянках, що дозволяє оптимально розташувати сонячні панелі та забезпечити високий рівень генерації електроенергії..
Фасадні BIPV сонячні електростанції	Інтегруються в конструкцію фасадів, дозволяючи ефективно використовувати поверхню будівель для виробництва електроенергії.
Сонячні навіси і парковки	Поєднують функції навісних конструкцій і фотоелектричних систем, одночасно виробляючи електроенергію та забезпечуючи захист від атмосферних впливів.
Плаваючі сонячні електростанції	Розташовуються на водній поверхні, не потребуючи додаткових земельних ділянок та сприяючи зниженню інтенсивності

	випаровування води.
Мобільні (переносні) сонячні електростанції	Завдяки невеликій вазі та компактним розмірам можуть використовуватися в різноманітних локаціях і для різних потреб енергозабезпечення.



Рисунок 2.1. Наземні сонячні електростанції

Основною перевагою наземних сонячних електростанцій є можливість встановлення фотоелектричної системи необхідної потужності відповідно до потреб споживача. Це особливо важливо для створення резервних джерел електропостачання, здатних повністю або частково компенсувати відключення електроенергії від централізованої мережі.

Незважаючи на те, що реалізація таких проєктів може потребувати додаткового часу для оформлення земельної ділянки та отримання необхідних дозвільних документів, наземне розміщення забезпечує можливість встановлення значної кількості фотоелектричних модулів. Це дозволяє збільшити встановлену потужність електростанції та підвищити обсяги виробництва електроенергії.

Економічна ефективність наземних сонячних електростанцій визначається низкою чинників, серед яких технічні характеристики обладнання, рівень сонячної радіації, орієнтація та кут нахилу панелей, а також місце розташування об'єкта. За сприятливих умов термін окупності інвестицій

у сонячну електростанцію середньої потужності зазвичай становить близько 3,5–4 років, після чого вироблена електроенергія забезпечує стабільний економічний ефект протягом тривалого періоду експлуатації.

До складу сонячної електростанції входить комплекс обладнання, що забезпечує виробництво, перетворення, накопичення та облік електричної енергії. Основними складовими такої системи є:

1. Фотоелектричні модулі (сонячні панелі) — основний елемент станції, призначений для перетворення енергії сонячного випромінювання на електричну енергію постійного струму.

2. Контролер керування фотоелектричною системою — пристрій, який контролює режими роботи системи, регулює процес заряджання акумуляторних батарей та забезпечує захист обладнання від перевантажень, перезаряду і зворотного струму.

3. Акумуляторні батареї — використовуються для накопичення та зберігання виробленої електроенергії з метою її подальшого використання в періоди недостатньої сонячної активності або відсутності генерації.

4. Інвертор — здійснює перетворення постійного струму, виробленого фотоелектричними модулями або накопиченого в акумуляторах, у змінний струм із параметрами, необхідними для живлення електричних споживачів або передачі електроенергії в мережу.

5. Електричний лічильник — призначений для обліку виробленої, спожитої або переданої до електричної мережі електроенергії та контролю енергетичних потоків у системі.

Узгоджена робота зазначених компонентів забезпечує ефективне функціонування сонячної електростанції, виробництво електричної енергії та її передачу споживачам або до централізованої електричної мережі. Схему взаємодії основних елементів та принцип роботи сонячної електростанції наведено на рис. 2.2.



Рисунок 2.2. Схема сонячної електростанції

Робота сонячної електростанції ґрунтується на процесі перетворення енергії сонячного випромінювання на електричну енергію. Під дією сонячних променів у фотоелектричних модулях виникає електричний струм завдяки фотоелектричному ефекту. Отримана електрична енергія у вигляді постійного струму надалі використовується для живлення споживачів, накопичення в акумуляторних батареях або передачі до електричної мережі.

Основою фотоелектричних модулів є напівпровідникові матеріали, переважно монокристалічний або полікристалічний кремній. Монокристалічні модулі характеризуються вищим коефіцієнтом корисної дії, кращими експлуатаційними характеристиками та тривалішим терміном служби порівняно з більшістю інших типів сонячних елементів. Завдяки цьому вони широко використовуються в сучасних фотоелектричних системах.

Обсяг електричної енергії, що виробляється сонячною електростанцією, залежить від низки факторів, серед яких основними є ефективність фотоелектричних модулів, площа їх поверхні, інтенсивність сонячного випромінювання, кліматичні умови та географічне розташування об'єкта. Правильний вибір обладнання та оптимальне розміщення сонячних панелей

дозволяють забезпечити максимальну продуктивність фотоелектричної системи.

Після вироблення електричної енергії фотоелектричними модулями вона може накопичуватися в акумуляторних батареях для подальшого використання або через інвертор надходити безпосередньо до споживачів. У мережових фотоелектричних системах надлишок виробленої електроенергії передається до зовнішньої електричної мережі, що дозволяє підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів та забезпечити додатковий економічний ефект.

Одним із ключових чинників, що впливають на продуктивність сонячної електростанції, є правильна орієнтація фотоелектричних модулів відносно сторін горизонту. Для умов Північної півкулі найбільш ефективним вважається розташування панелей у південному напрямку, оскільки воно забезпечує максимальне надходження сонячного випромінювання протягом дня.

Не менш важливим параметром є кут нахилу сонячних панелей, від якого залежить кількість поглинутої сонячної енергії. За даними досліджень, наведених Лещишиним та співавторами, оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів становить від 35° до 45° , що дозволяє досягти високих показників виробництва електроенергії впродовж року (рис. 2.3).



Рисунок 2.3. Рівень генерації, %

За способом підключення до електричної мережі сонячні електростанції поділяються на мережеві та автономні.

Мережеві сонячні електростанції (рис. 2.4) працюють паралельно з централізованою електричною мережею та є найбільш поширеним типом фотоелектричних систем. Вироблена електроенергія насамперед використовується для забезпечення потреб споживача, а надлишок передається до зовнішньої електромережі через відповідні прилади обліку.

Підключення до мережі дозволяє встановлювати фотоелектричні системи значної потужності без необхідності використання великої кількості акумуляторних батарей. Завдяки цьому підвищується економічна ефективність експлуатації станції та забезпечується можливість реалізації надлишкової електроенергії. У разі недостатньої генерації сонячної енергії споживач може отримувати необхідний обсяг електроенергії безпосередньо з централізованої мережі.

Таким чином, мережеві сонячні електростанції забезпечують ефективне використання виробленої електроенергії, дозволяють зменшити витрати на електропостачання та підвищують рівень енергетичної незалежності споживачів.

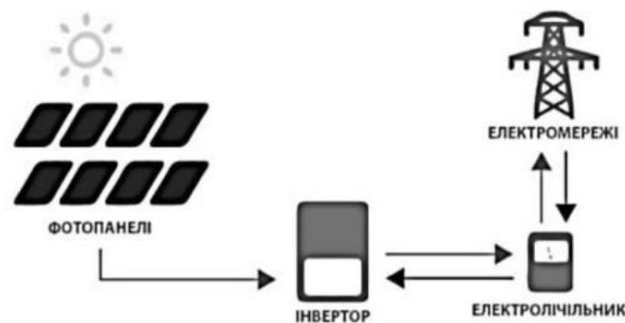


Рисунок 2.4. Мережева СЕС

Мережева сонячна електростанція інтегрується з внутрішньою електричною мережею будинку та централізованою системою електропостачання. Така система забезпечує споживача електроенергією як від власної фотоелектричної установки, так і від зовнішньої електромережі залежно від поточних умов генерації та рівня споживання.

Однією з головних переваг мережевої сонячної електростанції є можливість ефективного балансування між обсягами виробництва та споживання електроенергії. У періоди, коли фотоелектрична система виробляє більше електроенергії, ніж потребує споживач, надлишок може передаватися до централізованої електромережі. Натомість за недостатнього рівня генерації, наприклад у нічний час або за несприятливих погодних умов, необхідна електроенергія надходить із зовнішньої мережі.

Такий принцип роботи дозволяє максимально ефективно використовувати вироблену сонячну електроенергію, зменшувати витрати на електропостачання та підвищувати економічну доцільність впровадження фотоелектричних систем. Крім того, можливість передачі надлишкової електроенергії до мережі сприяє більш раціональному використанню енергетичних ресурсів і підвищує загальну ефективність роботи енергосистеми.

Завдяки відносно простій конструкції та невеликій кількості необхідного обладнання мережеві фотоелектричні системи є одним із найбільш доступних і поширених варіантів сонячних електростанцій для житлових будинків. Відсутність потреби у потужних системах накопичення енергії дозволяє знизити початкові витрати на встановлення та спростити експлуатацію системи.

Автономні сонячні електростанції призначені переважно для забезпечення власних потреб споживача в електричній енергії. Їх потужність визначається величиною електричного навантаження та складом підключених електроприймачів. Такі системи найчастіше використовуються в місцях, де відсутній доступ до централізованої електричної мережі або його підключення є економічно недоцільним.

До складу автономних фотоелектричних систем, як правило, входять сонячні модулі, контролер заряду, акумуляторні батареї та інвертор. Акумулятори забезпечують накопичення виробленої електроенергії та її використання у періоди недостатньої сонячної активності або в нічний час.

Залежно від конфігурації системи можливе також підключення до зовнішньої електромережі для резервного електропостачання або передачі надлишкової електроенергії через окремий прилад обліку (рис. 2.5). Такий підхід підвищує надійність електропостачання та забезпечує більш ефективне використання виробленої електроенергії.

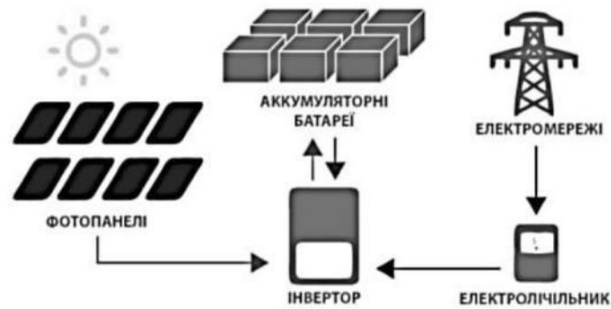


Рисунок 2.5. Автономна СЕС

Автономна сонячна електростанція функціонує незалежно від централізованої електричної мережі та забезпечує споживача електроенергією виключно за рахунок власних джерел генерації та накопичення енергії. Такі системи найчастіше використовуються в районах, де відсутнє централізоване електропостачання або його підключення є технічно складним чи економічно не вигідним.

Оскільки автономна система не має можливості отримувати електроенергію із зовнішньої мережі, обов'язковим її елементом є акумуляторні батареї, призначені для накопичення надлишкової електроенергії, виробленої в періоди високої сонячної активності. Накопичена енергія використовується в нічний час або за несприятливих погодних умов, коли генерація електроенергії сонячними модулями знижується.

Для підвищення надійності електропостачання до складу автономної сонячної електростанції часто включають резервний електричний генератор. Його використовують у випадках тривалого дефіциту сонячної енергії, значного розряду акумуляторних батарей або різкого збільшення електричного

навантаження. Наявність резервного джерела живлення дозволяє забезпечити безперебійну роботу електроспоживачів навіть за несприятливих умов експлуатації.

Таким чином, автономні сонячні електростанції забезпечують високий рівень енергетичної незалежності, проте потребують використання додаткових систем накопичення та резервування енергії для гарантування стабільного електропостачання.

Дахові сонячні електростанції (рис. 2.6) розміщуються на плоских, скатних та інших типах покрівель будівель і споруд. Такий спосіб встановлення дозволяє ефективно використовувати наявні площі без залучення додаткових земельних ресурсів, що особливо актуально в умовах щільної міської забудови.

Важливим етапом проєктування є також розроблення та погодження проєктно-кошторисної й технічної документації відповідно до чинних нормативних вимог. За необхідності документація проходить погодження з органами енергетичного нагляду та іншими уповноваженими установами.

Використання дахових сонячних електростанцій дозволяє скоротити витрати на електропостачання, підвищити енергоефективність будівель та ефективно використовувати наявний архітектурний простір для виробництва екологічно чистої електроенергії.



Рисунок 2.6. Дахові сонячні електростанції

У пояснювальній записці, яка є складовою частиною проєктної документації, наводяться розрахунки електропостачання та електроспоживання

об'єкта, визначаються максимальні електричні навантаження, обґрунтовуються параметри системи обліку виробленої та спожитої електроенергії, а також описуються заходи щодо електробезпеки, зокрема система заземлення та засоби захисту електрообладнання. Крім того, у документації подаються результати оцінки можливого впливу сонячної електростанції на навколишнє середовище, включаючи водні об'єкти, рослинний і тваринний світ, а також інші природні компоненти території розміщення об'єкта.

Фасадні BIPV-сонячні електростанції (Building Integrated Photovoltaics) (рис. 2.7) являють собою фотоелектричні системи, інтегровані безпосередньо в конструкції будівель і споруд. На відміну від традиційних сонячних електростанцій, такі системи не лише виробляють електричну енергію, а й виконують функції будівельних елементів, частково або повністю замінюючи фасадні панелі, покрівельні покриття, світлопрозорі конструкції та інші елементи зовнішньої оболонки будівлі.

Використання технології BIPV дозволяє поєднати архітектурні та енергетичні функції споруди, підвищити її енергоефективність і зменшити споживання електроенергії з традиційних джерел. Завдяки стрімкому розвитку фотоелектричних технологій та зростанню вимог до енергоефективності будівель BIPV-системи розглядаються як один із найбільш перспективних напрямів розвитку сонячної енергетики та сучасного будівництва.



Рисунок 2.7. Фасадні BIPV сонячні електростанції

Сучасні BIPV-системи підвищують функціональну та економічну цінність будівель не лише завдяки виробництву електричної енергії, а й завдяки поєднанню енергогенеруючих та будівельних функцій. Інтеграція фотоелектричних елементів у конструкції будівель дозволяє ефективно використовувати площу фасадів і покрівель, одночасно покращуючи енергетичні характеристики споруди.

Особливий інтерес становить використання фотоелектричного активного скління, яке виконує роль конструктивного елемента будівлі та одночасно генерує електроенергію. Такі системи забезпечують належний рівень тепло- і звукоізоляції, сприяють регулюванню природного освітлення приміщень та підвищують комфортність внутрішнього середовища. Крім того, фотоелектричне скління здатне частково фільтрувати ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання, забезпечуючи оптимальне використання видимої частини сонячного спектра для природного освітлення приміщень.

За своєю конструкцією фотоелектричне BIPV-скління практично не відрізняється від традиційних світлопрозорих конструкцій. Завдяки цьому воно легко інтегрується в огорожувальні елементи будівель, зокрема фасади, навісні стіни, покрівельні ліхтарі та інші архітектурні конструкції, виконуючи функції як будівельного матеріалу, так і джерела електричної енергії.

Таким чином, використання BIPV-технологій сприяє підвищенню енергоефективності будівель, зменшенню експлуатаційних витрат та впровадженню концепцій сталого й енергоощадного будівництва.

3. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

3.1 Оцінка факторів, які визначають ефективність роботи фотоелектричних систем

Сучасні фотоелектричні елементи, сонячні модулі, фотоелектричні установки та сонячні електростанції повинні відповідати комплексу технічних, економічних і експлуатаційних вимог, які забезпечують їх ефективне та довготривале використання [9, 10]. До основних вимог належать:

- висока надійність і довговічність, що забезпечує стабільну роботу обладнання протягом тривалого терміну експлуатації, який може перевищувати 25–30 років;
- доступність сировинних ресурсів і технологій виробництва, що створює передумови для масштабного виготовлення фотоелектричного обладнання та його широкого впровадження;
- економічна доцільність, яка характеризується прийнятними термінами окупності інвестицій у будівництво та експлуатацію сонячних електростанцій;
- низькі експлуатаційні витрати, що включають мінімальні витрати на технічне обслуговування, ремонт і підтримання працездатності обладнання;
- висока ефективність перетворення сонячної енергії на електричну, яка визначає продуктивність фотоелектричних систем та їх конкурентоспроможність порівняно з іншими джерелами енергії.

Виконання зазначених вимог є необхідною умовою для забезпечення ефективного функціонування сонячних електростанцій та подальшого розвитку фотоелектричної енергетики.

Ефективність роботи фотоелектричних елементів і сонячних панелей залежить від багатьох технічних, економічних та природно-кліматичних чинників. Використання сонячної енергії має низку переваг, які сприяють її широкому впровадженню в сучасній енергетиці.

До основних переваг сонячної енергетики належать:

- невичерпність енергетичного ресурсу — сонячне випромінювання є доступним природним джерелом енергії, використання якого не потребує витрат на придбання палива. Основним матеріалом для виробництва більшості фотоелектричних модулів є кремній, запаси якого є значними та доступними для промислового використання;
- екологічна безпечність процесу генерації електроенергії — під час роботи фотоелектричних систем не відбувається спалювання палива, відсутні шкідливі викиди в атмосферу, виробничі відходи та значний негативний вплив на навколишнє середовище;
- низький рівень шуму — фотоелектричні модулі працюють практично безшумно, що дозволяє використовувати їх як у промислових зонах, так і поблизу житлових будівель;
- можливість автономного енергозабезпечення — сонячні електростанції можуть функціонувати як у складі централізованих енергосистем, так і як незалежні джерела електроенергії для віддалених об'єктів.

Завдяки зазначеним перевагам сонячна енергетика є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку відновлюваних джерел енергії та відіграє важливу роль у забезпеченні енергетичної безпеки та екологічної сталості.

До переваг і недоліків фотоелектричних систем, які впливають на ефективність та доцільність їх використання, належать такі фактори:

Переваги:

- висока надійність і тривалий термін експлуатації — сучасні фотоелектричні модулі здатні ефективно працювати протягом 25–30 років. При цьому після 20–25 років експлуатації зниження їхньої продуктивності зазвичай не перевищує 20 %;
- можливість переробки та повторного використання матеріалів — більшість компонентів сонячних панелей підлягає вторинній переробці, що сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище та раціональному використанню ресурсів;

- простота експлуатації та обслуговування — після встановлення фотоелектричні системи працюють переважно в автоматичному режимі та потребують мінімального технічного обслуговування;
- придатність для побутового використання — сонячні електростанції можуть ефективно використовуватися для енергозабезпечення приватних будинків та інших малих об'єктів;
- можливість інтеграції з іншими джерелами енергії — фотоелектричні системи легко поєднуються з традиційними або альтернативними системами енергопостачання, виконуючи функції додаткового чи резервного джерела електроенергії.

Недоліки:

- залежність від кліматичних умов та часу доби — продуктивність сонячних панелей визначається рівнем сонячної радіації та знижується в нічний час, за хмарної погоди або в регіонах із недостатньою інсоляцією;
- необхідність накопичення електроенергії — для забезпечення безперебійного електропостачання часто виникає потреба у використанні акумуляторних систем або інших засобів накопичення енергії;
- значні початкові інвестиції — придбання та монтаж фотоелектричного обладнання потребують суттєвих капіталовкладень, що особливо відчутно для побутових споживачів;
- необхідність періодичного очищення поверхні модулів — накопичення пилу, бруду, снігу та інших забруднень може призводити до зниження ефективності генерації електроенергії;
- потреба у значних площах для розміщення обладнання — для досягнення високих показників виробництва електроенергії необхідно встановлювати велику кількість фотоелектричних модулів, що потребує відповідних площ для їх розміщення.

Таким чином, ефективність фотоелектричних систем визначається поєднанням технічних, економічних та природно-кліматичних факторів, які

необхідно враховувати під час проектування та експлуатації сонячних електростанцій.

Одним із найважливіших показників роботи фотоелектричних систем є коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячних батарей, який характеризує частку сонячного випромінювання, що перетворюється на електричну енергію. Чим вищим є значення ККД, тим більше електроенергії може бути отримано з однакової площі фотоелектричних модулів.

Завдяки стрімкому розвитку фотоелектричних технологій та вдосконаленню конструкції сонячних елементів ефективність сучасних сонячних панелей постійно зростає. Якщо ще кілька років тому середній коефіцієнт корисної дії комерційних фотоелектричних модулів становив близько 15 %, то сьогодні цей показник для більшості сучасних панелей перевищує 20 %.

Підвищення ефективності фотоелектричних елементів безпосередньо вплинуло на їхню продуктивність. Зокрема, номінальна потужність стандартних сонячних панелей збільшилася приблизно з 250 Вт до 400 Вт і більше без суттєвого збільшення їхніх габаритних розмірів. Це дозволяє отримувати більші обсяги електроенергії з тієї самої площі встановлення та підвищує економічну ефективність фотоелектричних систем.

Таким чином, підвищення коефіцієнта корисної дії фотоелектричних модулів є одним із ключових напрямів розвитку сонячної енергетики, оскільки сприяє зростанню продуктивності сонячних електростанцій та зменшенню вартості виробленої електроенергії.

Ефективність сонячних елементів, або фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), значною мірою залежить від їхньої конструкції, технології виготовлення та властивостей напівпровідникового матеріалу. Найчастіше як основа для виготовлення фотоелементів використовується кремній р-типу або n-типу, що забезпечує формування р–n-переходу, необхідного для виникнення фотоелектричного ефекту.

Одним із важливих параметрів, що характеризує ефективність роботи фотоелектричного елемента, є коефіцієнт заповнення (*Fill Factor, FF*). Цей показник відображає ступінь наближення реальної вольт-амперної характеристики фотоелемента до ідеальної та визначає його здатність виробляти максимальну електричну потужність за заданих умов освітлення.

Чим вищим є значення коефіцієнта заповнення, тим ефективніше фотоелектричний елемент перетворює сонячну енергію на електричну. Коефіцієнт заповнення безпосередньо пов'язаний із максимальною потужністю, яку може забезпечити фотоелемент при оптимальних значеннях напруги та струму, і тому є одним із ключових показників при оцінці якості та продуктивності сонячних батарей.

Таким чином, загальна ефективність фотоелектричного перетворювача визначається сукупністю таких параметрів, як тип напівпровідникового матеріалу, якість р–п-переходу, рівень втрат енергії та значення коефіцієнта заповнення, що характеризує ефективність роботи елемента в режимі максимальної потужності.

Конструктивні особливості фотоелектричних перетворювачів суттєво впливають на їхню ефективність та енергетичні характеристики. До основних факторів належать тип напівпровідникового матеріалу, конфігурація струмознімних контактів, структура р–п-переходу, а також технології пасивації поверхні, спрямовані на зменшення втрат енергії.

Одними з найбільш ефективних на сьогодні є фотоелектричні модулі, виготовлені на основі технології IBC (*Interdigitated Back Contact*). Завдяки використанню високочистого кремнію n-типу та розташуванню контактів на тильній стороні елемента вдається мінімізувати втрати від затінення активної поверхні. Це забезпечує коефіцієнт корисної дії на рівні 20–22 % і вище.

Високі показники ефективності також демонструють сучасні монокристалічні фотоелементи, виготовлені за технологіями PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*), TOPCon (*Tunnel Oxide Passivated Contact*) та HJT (*Heterojunction Technology*). Завдяки вдосконаленій конструкції та

використанню сучасних методів пасивації такі фотоелементи забезпечують ефективність понад 21 %, що сприяє їх широкому застосуванню у сучасних фотоелектричних системах.

Перспективним напрямом розвитку сонячної енергетики є використання тандемних перовскіт-кремнієвих фотоелементів, які поєднують переваги різних напівпровідникових матеріалів для більш повного використання сонячного спектра. Хоча ця технологія ще перебуває на стадії активних досліджень і вдосконалення, очікується, що найближчими роками вона стане комерційно доступною та дозволить суттєво підвищити ефективність фотоелектричних систем порівняно з існуючими рішеннями.

Ефективність сонячних панелей визначається за стандартних умов випробувань (STC — Standard Test Conditions), які передбачають температуру фотоелемента 25 °C, інтенсивність сонячного випромінювання 1000 Вт/м² та спектральний розподіл сонячного світла AM1,5. За цих умов оцінюються основні електричні характеристики фотоелектричних модулів та визначається їх номінальна потужність.

Коефіцієнт корисної дії сонячної панелі розраховується як відношення максимальної вихідної потужності панелі до потужності сонячного випромінювання, що надходить на її активну поверхню. Таким чином, ефективність характеризує здатність фотоелектричного модуля перетворювати сонячну енергію на електричну.

На величину ККД впливає низка факторів, серед яких основними є температура фотоелементів, рівень сонячної радіації, тип використовуваних фотоелектричних перетворювачів, а також схема їх електричного з'єднання в модулі. Важливе значення мають також конструктивні особливості панелі та матеріали, використані під час її виготовлення.

Зокрема, на ефективність роботи сонячного модуля може впливати колір захисного тильного покриття. Темні матеріали поглинають більшу кількість сонячної енергії та нагріваються інтенсивніше, що призводить до підвищення температури фотоелементів. Зростання температури супроводжується

збільшенням внутрішнього електричного опору та, як наслідок, певним зниженням ефективності перетворення сонячної енергії на електричну.

Використання світліших матеріалів для тильного покриття сприяє кращому відведенню тепла та зменшенню нагрівання фотоелементів, що позитивно впливає на продуктивність сонячної панелі. Тому під час проєктування фотоелектричних систем важливо враховувати не лише електричні характеристики фотоелементів, а й конструктивні особливості модулів, які можуть впливати на їхню експлуатаційну ефективність.

Серед сучасних фотоелектричних технологій найвищі показники ефективності демонструють сонячні панелі, виготовлені на основі технології IBC (Interdigitated Back Contact). Завдяки особливій конструкції з розташуванням електричних контактів на тильній стороні фотоелемента вони забезпечують мінімальні втрати енергії та високий коефіцієнт корисної дії.

Дещо нижчими, але також дуже високими показниками ефективності характеризуються фотоелементи, виготовлені за технологіями HJT (Heterojunction Technology) та TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact). Високу продуктивність забезпечують і сучасні монокристалічні фотоелементи типу PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), які широко застосовуються у виробництві комерційних сонячних модулів.

Традиційні монокристалічні фотоелектричні модулі стандартної конструкції мають дещо нижчий рівень ефективності, проте залишаються одними з найпоширеніших завдяки оптимальному співвідношенню вартості та продуктивності. Найменші показники ефективності, як правило, характерні для полікристалічних (мультикристалічних) сонячних панелей, які водночас відзначаються нижчою вартістю виробництва.

Останніми роками спостерігається активне впровадження високоефективних фотоелектричних модулів на основі гетероперехідних фотоелементів n-типу. Окрім високого коефіцієнта корисної дії, такі панелі характеризуються низькими темпами деградації. Річне зниження їхньої

продуктивності становить близько 0,25 %, що є одним із найкращих показників серед сучасних фотоелектричних технологій.

Завдяки низькому рівню деградації вискоефективні сонячні панелі здатні зберігати значну частину початкової потужності протягом тривалого часу. За умови дотримання рекомендованих режимів експлуатації багато сучасних модулів після 25 років роботи забезпечують понад 90 % від початкової номінальної потужності, що підтверджує їхню довговічність та економічну доцільність використання у фотоелектричних системах.

Термін «ефективність» часто використовується як один із основних показників якості сонячних панелей, проте високий коефіцієнт корисної дії не завжди свідчить про загальну перевагу конкретного фотоелектричного модуля. Під час вибору сонячних панелей важливими є не лише показники ефективності, а й якість виготовлення, надійність конструкції, стабільність роботи протягом усього терміну експлуатації, сервісна підтримка виробника та гарантійні зобов'язання.

Реальна продуктивність фотоелектричних систем визначається комплексом технічних та зовнішніх факторів, серед яких особливе значення має інтенсивність сонячного випромінювання. Саме цей показник визначає кількість енергії, доступної для перетворення на електричну. Рівень сонячної радіації залежить від географічного розташування об'єкта, пори року, часу доби, хмарності та інших метеорологічних умов.

Важливим фактором, що впливає на ефективність фотоелектричних перетворювачів, є також температура навколишнього середовища та температура самих фотоелементів. Для більшості кремнієвих фотоелектричних модулів характерне зниження ефективності зі збільшенням температури. Підвищення температури призводить до зростання внутрішніх втрат і зменшення вихідної напруги фотоелементів, що негативно впливає на загальну продуктивність сонячної панелі.

Таким чином, ефективна робота фотоелектричних систем залежить не лише від технічних характеристик обладнання, а й від умов його експлуатації.

Тому під час проектування сонячних електростанцій необхідно враховувати як якість фотоелектричних модулів, так і природно-кліматичні фактори, що впливають на їхню продуктивність.

Хоча коефіцієнт корисної дії є важливою характеристикою сонячної панелі, він не може розглядатися як єдиний критерій оцінки її якості. Вищий показник ефективності не завжди свідчить про кращі експлуатаційні характеристики модуля. Не менш важливими є якість виготовлення, надійність конструкції, стійкість до деградації, сервісна підтримка виробника та гарантійні умови.

На продуктивність фотоелектричних систем значний вплив має інтенсивність сонячного випромінювання, яка є одним із головних факторів генерації електроенергії. Її величина залежить від географічної широти місцевості, пори року, часу доби, а також поточних погодних умов. Зі збільшенням рівня сонячної радіації зростає кількість енергії, що надходить на поверхню фотоелектричних модулів, а отже, підвищується їхня продуктивність.

Важливим чинником є також температурний режим роботи фотоелектричних модулів. Для більшості кремнієвих фотоелектричних перетворювачів характерне зниження ефективності зі збільшенням температури. Підвищення температури фотоелементів призводить до зменшення вихідної напруги та збільшення внутрішніх втрат, що негативно впливає на виробіток електроенергії.

Суттєвий вплив на ефективність фотоелектричних систем має стан поверхні модулів. Накопичення пилу, бруду, листя, снігу та інших забруднень зменшує кількість сонячного випромінювання, що досягає поверхні фотоелементів, унаслідок чого знижується рівень генерації електричної енергії [8].

Не менш важливими параметрами є кут нахилу та орієнтація фотоелектричних модулів відносно Сонця. Від правильності їх вибору залежить кількість сонячної енергії, яку здатна поглинути поверхня панелей.

Оптимальний кут нахилу визначається географічною широтою місцевості, сезонними особливостями та режимом експлуатації сонячної електростанції. Правильно обрані орієнтація та кут нахилу дозволяють максимально використовувати потенціал сонячного випромінювання та підвищити ефективність роботи фотоелектричної системи.

На рис. 3.1 наведено оптимальні значення кута нахилу фотоелектричних модулів відносно горизонту для забезпечення максимальної ефективності перетворення сонячної енергії в електричну [3].



Рис. 3.1 Оптимальний кут нахилу ФЕП відносно сонця

Важливим чинником, що впливає на роботу фотоелектричних систем, є **спектральний склад сонячного випромінювання**. Його характеристики змінюються залежно від часу доби, пори року, стану атмосфери та кута падіння сонячних променів. Оскільки різні типи фотоелектричних перетворювачів мають неоднакову спектральну чутливість, зміни спектрального складу сонячного випромінювання можуть суттєво впливати на їхню продуктивність та ефективність перетворення енергії.

Окрім зовнішніх умов експлуатації, на ефективність фотоелектричних систем значний вплив мають **внутрішні фактори**, до яких належать характеристики фотоелектричних перетворювачів, конфігурація системи, якість використовуваного обладнання, а також втрати енергії під час її перетворення, передачі та накопичення [11].

Одним із найважливіших внутрішніх факторів є **ефективність фотоелектричних перетворювачів**, яка визначається технологією їх виготовлення, типом напівпровідникового матеріалу та якістю виробничого процесу. Фотоелементи з вищим коефіцієнтом корисної дії здатні виробляти більшу кількість електроенергії за однакових умов освітлення та площі поверхні, що безпосередньо підвищує продуктивність усієї фотоелектричної системи.

Таким чином, ефективність роботи сонячної електростанції залежить не лише від інтенсивності сонячного випромінювання та кліматичних умов, а й від технічних характеристик її основних компонентів. Використання високоякісних фотоелектричних перетворювачів і оптимізація параметрів системи є важливими умовами підвищення її енергетичної ефективності та економічної доцільності.

Важливий вплив на ефективність роботи фотоелектричної системи мають її **розміри та конфігурація**. Кількість фотоелектричних модулів, схема їх електричного з'єднання, розташування інверторів та інших елементів системи визначають рівень виробництва електроенергії, надійність роботи та загальну продуктивність установки.

Не менш важливим фактором є **якість і надійність компонентів фотоелектричної системи**. Технічні характеристики фотоелектричних модулів, інверторів, кабельних ліній, з'єднувальних елементів та захисного обладнання безпосередньо впливають на ефективність перетворення та передачі електричної енергії, а також на довговічність усієї системи.

У процесі роботи фотоелектричних установок виникають різноманітні **енергетичні втрати**, які знижують загальну ефективність системи. До основних належать резистивні втрати в кабелях і контактних з'єднаннях, втрати під час перетворення електроенергії в інверторах, а також втрати, пов'язані з неоднаковими характеристиками окремих фотоелектричних модулів у складі системи [12].

Важливу роль у забезпеченні максимальної продуктивності фотоелектричної установки відіграє **система відстеження точки максимальної потужності (MPPT)**. Ефективність роботи MPPT-контролера або інвертора визначає здатність системи автоматично адаптуватися до змін рівня сонячного випромінювання та температурних умов, підтримуючи роботу фотоелектричних модулів у режимі максимальної вихідної потужності.

На довгострокову ефективність фотоелектричних систем також впливає **процес деградації фотоелектричних перетворювачів**. Під дією ультрафіолетового випромінювання, температурних коливань, вологості та інших зовнішніх факторів відбувається поступове погіршення характеристик фотоелементів, що призводить до зниження їх продуктивності протягом терміну експлуатації [13].

Таким чином, ефективність фотоелектричної системи визначається сукупністю конструктивних, технічних та експлуатаційних факторів. Врахування цих чинників під час проєктування, монтажу та експлуатації сонячних електростанцій дозволяє підвищити їхню продуктивність, надійність та економічну ефективність.

Важливою умовою забезпечення високої ефективності фотоелектричних систем є **постійний моніторинг їхнього технічного стану та продуктивності**. Своєчасне виявлення несправностей, відхилень у роботі обладнання або зниження виробітку електроенергії дозволяє оперативно вживати необхідних коригувальних заходів і підтримувати систему в оптимальному режимі роботи.

Значну роль у збереженні ефективності фотоелектричних установок відіграє **регулярне технічне обслуговування**. До основних профілактичних заходів належать очищення поверхні фотоелектричних модулів від пилу та забруднень, перевірка електричних з'єднань, контроль роботи інверторів і захисного обладнання, а також оновлення програмного забезпечення систем моніторингу та керування. Проведення таких заходів сприяє стабільній роботі обладнання та мінімізації енергетичних втрат.

Одним із ключових факторів досягнення високої продуктивності є **правильне проєктування фотоелектричної системи**. Під час розроблення проєкту необхідно враховувати кліматичні особливості місцевості, рівень сонячної інсоляції, орієнтацію та кут нахилу модулів, вибір обладнання і схему побудови системи. Комплексний підхід до проєктування дозволяє максимально реалізувати потенціал сонячної електростанції.

Для зменшення негативного впливу підвищених температур на роботу фотоелектричних модулів можуть застосовуватися **системи охолодження та вентиляції**. Особливо актуальними такі рішення є для регіонів із високими температурами повітря, де перегрів фотоелементів може суттєво знижувати їхній коефіцієнт корисної дії.

Додатковим способом підвищення ефективності фотоелектричних систем є використання **сонячних трекерів та концентраторів сонячного випромінювання**. Системи стеження за Сонцем забезпечують оптимальну орієнтацію модулів протягом дня, а концентратори збільшують інтенсивність випромінювання, що надходить на поверхню фотоелементів. Це дозволяє підвищити виробництво електроенергії та покращити загальну ефективність роботи фотоелектричної установки [14].

Таким чином, підвищення ефективності фотоелектричних систем досягається завдяки поєднанню сучасних технологічних рішень, якісного проєктування, регулярного технічного обслуговування та постійного контролю параметрів роботи обладнання.

На рис. 3.2 наведено типову схему функціонування сонячної електростанції потужністю 10 кВт [15].



Рисунок 3.2 Типова схема функціонування сонячної станції

Важливим напрямом підвищення продуктивності фотоелектричних систем є **оптимізація їх розташування та способу встановлення**. Вибір місця монтажу на покрівлях, фасадах будівель або наземних конструкціях повинен здійснюватися з урахуванням рівня сонячної інсоляції, особливостей рельєфу місцевості, можливого затінення та інших експлуатаційних факторів. Рациональне розміщення фотоелектричних модулів дозволяє максимально використовувати потенціал сонячного випромінювання та підвищити виробіток електроенергії.

Значні перспективи для подальшого підвищення ефективності фотоелектричних систем пов'язані з **розробленням нових матеріалів і технологій виготовлення фотоелектричних перетворювачів**. Особливу увагу приділяють багатоперехідним (тандемним), перовскітним та органічним сонячним елементам, які мають потенціал забезпечити вищий коефіцієнт корисної дії порівняно з традиційними кремнієвими технологіями. Впровадження таких рішень сприяє підвищенню продуктивності фотоелектричних систем та розширенню сфер їх застосування.

Важливу роль у забезпеченні ефективної роботи сонячних електростанцій відіграє **удосконалення допоміжного обладнання**, зокрема інверторів, систем моніторингу, контролю та керування. Використання сучасних інтелектуальних систем дозволяє оптимізувати режими роботи обладнання, оперативно виявляти несправності та мінімізувати енергетичні втрати.

При оцінюванні ефективності фотоелектричних систем у довгостроковій перспективі необхідно також враховувати **екологічні аспекти їх життєвого циклу**. До таких аспектів належать утилізація та переробка відпрацьованих фотоелектричних модулів, рациональне використання матеріальних ресурсів, а також мінімізація негативного впливу на навколишнє середовище на всіх етапах виробництва, експлуатації та виведення обладнання з експлуатації.

Таким чином, підвищення ефективності фотоелектричних систем є комплексним завданням, що охоплює вдосконалення конструкції фотоелектричних перетворювачів, оптимізацію умов їх експлуатації, розвиток

систем керування та забезпечення екологічної безпеки протягом усього життєвого циклу обладнання.

Економічна ефективність фотоелектричних систем визначається не лише їхніми технічними характеристиками, а й сукупністю фінансових та організаційних факторів. До основних з них належать вартість фотоелектричних модулів та іншого обладнання, витрати на проектування і монтаж, експлуатаційні витрати, а також діючі тарифи на електричну енергію. Важливий вплив на економічну доцільність впровадження сонячних електростанцій мають державна політика у сфері відновлюваної енергетики, механізми фінансової підтримки, податкові пільги та нормативно-правове регулювання галузі [16].

Підвищення продуктивності фотоелектричних систем є одним із головних напрямів розвитку сучасної сонячної енергетики, оскільки безпосередньо впливає на ефективність використання обладнання та конкурентоспроможність виробленої електроенергії. Для досягнення цієї мети застосовують комплекс технічних і технологічних рішень, спрямованих на оптимізацію роботи фотоелектричних установок та збільшення їхнього енергетичного виробітку.

Одним із найбільш ефективних способів підвищення продуктивності є використання **високоефективних фотоелектричних перетворювачів**. Постійне вдосконалення технологій виробництва сонячних елементів дозволяє підвищувати коефіцієнт корисної дії та збільшувати кількість електроенергії, що генерується з одиниці площі фотоелектричних модулів.

Особливу перспективу мають **багатоперехідні (тандемні), перовскітні та органічні фотоелектричні перетворювачі**, які завдяки використанню нових матеріалів і вдосконалених конструкцій забезпечують більш ефективне поглинання сонячного випромінювання та вищі показники продуктивності порівняно з традиційними кремнієвими фотоелементами. Подальший розвиток цих технологій створює передумови для підвищення ефективності фотоелектричних систем і зниження вартості виробленої електроенергії [17].

Таким чином, поєднання сучасних високоефективних фотоелектричних технологій із раціональними економічними механізмами підтримки є важливою умовою подальшого розвитку та широкого впровадження сонячної енергетики.

Важливим напрямом підвищення ефективності фотоелектричних систем є **удосконалення конструкції та компонування фотоелектричних модулів**. Оптимізація конструктивних рішень дозволяє зменшити втрати енергії та підвищити продуктивність сонячних панелей без суттєвого збільшення їх вартості.

Для підвищення ефективності фотоелектричних модулів широко застосовуються **антивідбивні покриття**, які зменшують втрати сонячного випромінювання внаслідок відбиття від поверхні фотоелементів. Крім того, використання текстурованих поверхонь сприяє кращому поглинанню світла та збільшенню кількості фотонів, що беруть участь у процесі генерації електричної енергії. Важливе значення має також оптимізація електричних з'єднань між фотоелементами, що дозволяє знизити електричні втрати та підвищити загальний коефіцієнт корисної дії модуля.

Одним із найбільш ефективних способів збільшення виробітку електроенергії є застосування **систем стеження за Сонцем (сонячних трекерів)**. Такі системи забезпечують автоматичну зміну положення фотоелектричних модулів відповідно до переміщення Сонця небосхилом, підтримуючи максимально сприятливий кут падіння сонячних променів на поверхню панелей протягом дня.

Залежно від конструкції використовують **одноосьові** та **двоосьові трекери**. Одноосьові системи здійснюють поворот модулів навколо однієї осі, тоді як двоосьові забезпечують відстеження Сонця одночасно за двома координатами, що дозволяє досягти максимальної точності орієнтації. Використання таких систем може збільшити обсяг виробництва електроенергії приблизно на 20–40 % порівняно зі стаціонарно встановленими фотоелектричними модулями.

Таким чином, удосконалення конструкції фотоелектричних модулів і застосування систем стеження за Сонцем є ефективними технічними рішеннями, що дозволяють підвищити продуктивність фотоелектричних систем та покращити економічні показники їх експлуатації.

Перспективним напрямом підвищення ефективності фотоелектричних систем є застосування **концентраторів сонячного випромінювання**, зокрема лінз Френеля та параболічних дзеркал. Такі пристрої забезпечують фокусування сонячного випромінювання на відносно невеликій площі вискоелективних фотоелектричних перетворювачів, що дозволяє більш повно використовувати енергію сонячного потоку.

Використання концентраторних систем дає змогу зменшити площу дорогих фотоелектричних елементів, знизити витрати напівпровідникових матеріалів та одночасно підвищити загальну продуктивність фотоелектричної установки. Завдяки цьому концентраторні технології розглядаються як один із перспективних напрямів розвитку сучасної сонячної енергетики [9].

Важливим фактором підвищення продуктивності фотоелектричних систем є також **оптимізація роботи інверторів і систем керування**. Саме інвертори забезпечують перетворення постійного струму, виробленого фотоелектричними модулями, у змінний струм необхідних параметрів, а також здійснюють контроль режимів роботи всієї системи.

Для забезпечення максимальної ефективності сучасні інвертори оснащуються алгоритмами **відстеження точки максимальної потужності (MPPT — Maximum Power Point Tracking)**. Ці алгоритми дозволяють автоматично визначати оптимальні параметри роботи фотоелектричних модулів залежно від рівня сонячного випромінювання, температури та інших зовнішніх факторів.

Завдяки використанню MPPT-технологій фотоелектрична система постійно працює в режимі максимальної можливої потужності, що сприяє збільшенню виробітку електроенергії та підвищенню загальної ефективності сонячної електростанції. Особливо важливим це є в умовах змінної хмарності,

часткового затінення та значних температурних коливань, коли робочі параметри фотоелектричних модулів можуть істотно змінюватися протягом дня.

Одним із важливих способів підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів є **зниження їх робочої температури**. Для більшості кремнієвих фотоелементів характерне зменшення продуктивності зі зростанням температури, тому підтримання оптимального температурного режиму є важливою умовою забезпечення високого рівня генерації електроенергії.

Особливо актуальною проблема перегріву є для регіонів із високою інтенсивністю сонячного випромінювання та підвищеними температурами навколишнього середовища. У таких умовах застосовуються різноманітні **системи охолодження фотоелектричних модулів**, які сприяють зменшенню температурних втрат та підвищенню коефіцієнта корисної дії.

Для охолодження фотоелектричних перетворювачів можуть використовуватися як **пасивні**, так і **активні** системи. До пасивних належать радіатори, вентиляційні канали та теплові трубки, які забезпечують природне відведення тепла без додаткових витрат енергії. Активні системи охолодження передбачають використання примусової циркуляції повітря або рідини, зокрема водяного охолодження, що дозволяє ефективніше підтримувати оптимальну температуру роботи фотоелементів.

Не менш важливим фактором забезпечення високої продуктивності фотоелектричних систем є **регулярне технічне обслуговування**. У процесі експлуатації на поверхні сонячних модулів накопичуються пил, бруд, листя, сніг та інші забруднення, які зменшують кількість сонячного випромінювання, що потрапляє на фотоелементи. Це призводить до зниження виробітку електроенергії та загальної ефективності системи.

Регулярне очищення поверхні модулів, перевірка електричних з'єднань, контроль роботи інверторів та інших компонентів системи дозволяють підтримувати її працездатність на високому рівні. Крім того, своєчасне

виявлення та усунення несправностей запобігає додатковим втратам енергії та сприяє продовженню терміну служби обладнання [14].

Важливим чинником підвищення продуктивності фотоелектричних систем є **оптимізація розташування та орієнтації фотоелектричних модулів**. Під час проєктування сонячних електростанцій необхідно враховувати географічне положення об'єкта, кліматичні особливості регіону, рельєф місцевості та можливі джерела затінення. Правильний вибір кута нахилу та орієнтації модулів дозволяє максимально використовувати сонячне випромінювання та збільшити виробництво електроенергії протягом року.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності фотоелектричних систем є використання **систем накопичення енергії**. Оскільки виробництво електроенергії сонячними модулями залежить від наявності сонячного випромінювання, виникає необхідність у збереженні надлишкової енергії, виробленої в періоди високої інсоляції.

Для накопичення електроенергії найчастіше використовуються **аккумуляторні батареї**, які забезпечують її подальше використання в нічний час або під час несприятливих погодних умов. Крім того, значний потенціал мають **водневі системи зберігання енергії**, в яких надлишкова електроенергія використовується для виробництва водню методом електролізу. Надалі водень може застосовуватися як енергоносіє для виробництва електричної та теплової енергії.

Використання сучасних систем накопичення дозволяє підвищити рівень автономності фотоелектричних установок, забезпечити стабільність електропостачання та більш ефективно використовувати вироблену електроенергію. Це особливо важливо в періоди пікового споживання або за відсутності достатнього сонячного випромінювання [17–29].

Таким чином, оптимізація просторового розміщення фотоелектричних модулів та впровадження ефективних систем накопичення енергії є важливими заходами, спрямованими на підвищення енергетичної ефективності, надійності та економічної доцільності експлуатації фотоелектричних систем.

3.2 Основні фактори, що впливають на роботу фотоелемента

За результатами проведеного аналізу визначено перелік основних факторів, що впливають на ефективність роботи фотоелектричних систем. Серед них можна виділити чинники, на які людина здатна безпосередньо впливати під час проєктування, монтажу та експлуатації системи, а також фактори, вплив на які є обмеженим або практично неможливим, оскільки вони залежать від природно-кліматичних умов та особливостей навколишнього середовища.

Перелік основних факторів, на які може безпосередньо впливати людина, та їх пріоритетність наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 Перелік факторів впливу на роботу фотоелемента

Причина	Оцінка в балах (40 max)
Кут падіння сонячних променів на модуль [5,6]	40
Якість фотоелектричного елемента [8]	38
Рівномірність освітлення [5,6]	35
Приріст температури фотоелемента [5,6]	33
Відбиття світлового проміння від поверхні перетворювача [5,6]	28
Забруднення модуля [5,8]	28
Забруднення атмосфери (смог, дим від пожежі) [5]	25
Затінення жорстке [10]	23
Затінення м'яке [10]	22
Втрати у провідниках [10]	18
Втрати на нагрівання провідників [10]	17
Географічне розташування встановлення СБ [10]	16
Проходження частини випромінювання через ФЕП без поглинання [10]	15
Відбивання оптичного випромінювання від поверхні перетворювача [10]	14
Розсіювання на теплових коливаннях напівпровідникової ґратки надлишкової енергії фотонів (ріст температури) [10]	13
Не повне освітлення активної площі, що передбачає роботу на додатково створене власне навантаження та відповідно появу додаткового внутрішнього опору перетворювача [10]	12

4. ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ПОТУЖНІСТЮ 10 КВТ

Підвищення ефективності роботи фотоелектричної станції пропонується здійснювати шляхом впливу на зовнішні фактори, які найбільшою мірою визначають продуктивність фотоелектричних модулів. До основних напрямів модернізації належать:

- оптимізація орієнтації сонячних панелей відносно положення Сонця протягом дня;
- зниження температури фотоелектричних модулів шляхом застосування систем охолодження.

Перший напрям передбачає використання систем стеження за Сонцем (трекерів), які забезпечують підтримання оптимального кута падіння сонячних променів на поверхню фотоелектричних модулів. Це дозволяє збільшити кількість поглиненої сонячної енергії та підвищити виробіток електроенергії.

Другий напрям пов'язаний із необхідністю зменшення негативного впливу підвищеної температури на роботу фотоелектричних перетворювачів. Оскільки поверхня сонячних панелей має темне забарвлення та інтенсивно поглинає сонячне випромінювання, їх температура під час експлуатації зазвичай перевищує температуру навколишнього середовища. Підвищення температури фотоелементів супроводжується зниженням їх коефіцієнта корисної дії та, відповідно, зменшенням виробітку електроенергії.

4. 1. Обґрунтування кута нахилу фотоелектричних модулів

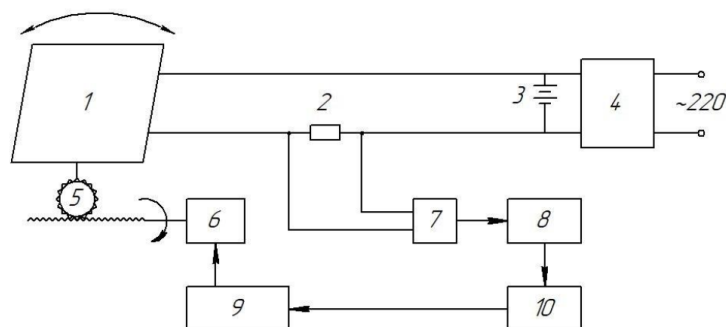
Як відомо, положення Сонця на небосхилі постійно змінюється внаслідок добового обертання Землі та її руху навколо Сонця. При цьому максимальна кількість сонячної енергії надходить на поверхню фотоелектричних модулів за умови, коли сонячні промені падають на них під кутом, близьким до 90° . Відхилення від цього положення призводить до зменшення інтенсивності

сонячного випромінювання, що сприймається поверхнею панелей, і, відповідно, до зниження виробітку електроенергії.

З метою забезпечення максимальної ефективності роботи фотоелектричної станції доцільним є використання системи орієнтації сонячних панелей відповідно до поточного положення Сонця. Реалізація такого рішення передбачає можливість автоматичного повороту фотоелектричних модулів у процесі зміни положення Сонця протягом дня.

Для виконання цього завдання пропонується застосувати систему стеження за Сонцем, яка забезпечуватиме поворот сонячних панелей навколо відповідної осі та підтримуватиме їх у положенні, близькому до оптимального щодо напрямку сонячного випромінювання. Це дозволить збільшити надходження сонячної енергії на поверхню фотоелектричних модулів та підвищити загальну продуктивність фотоелектричної станції.

Забезпечення повороту сонячних панелей пропонується реалізувати за допомогою простої автоматизованої системи керування. На рисунку 4.1 наведено блок-схему системи орієнтації сонячних батарей відносно положення Сонця.



- 1 – сонячна батарея, 2 – датчик струму, 3 – акумуляторна батарея,
 4 – інвертор, 5 – система повороту з шестернею та черв'ячним редуктором, 6 – кроковий двигун, 7 – підсилювач сигналу,
 – 8 – аналого-цифровий перетворювач, 9 – система керування кроковим двигуном, 10 – мікроконтролер

Рисунок 4.1 - Блок-схема системи повороту сонячних батарей

Ця схема реалізує принцип пошуку екстремуму, зображений на рисунку 4.2.

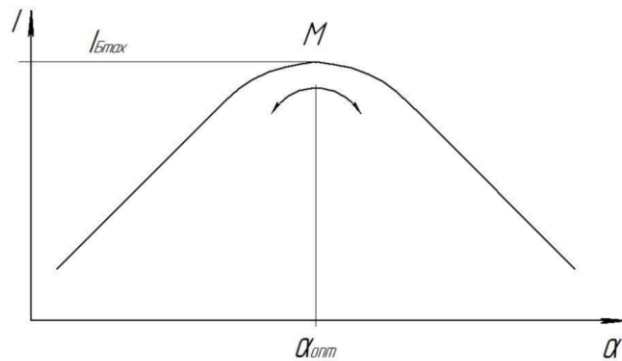


Рисунок 4.2 - Принцип пошуку екстремуму

Запропонована система забезпечує автоматичний поворот сонячної батареї в горизонтальній площині та визначення такого кута орієнтації α , за якого фотоелектричний модуль генерує максимальний струм $I_{\text{б max}}$. Пошук оптимального положення здійснюється шляхом безперервного контролю вихідного струму сонячної батареї та коригування її положення відносно Сонця.

Принцип роботи системи ґрунтується на використанні зворотного зв'язку за значенням струму, що виробляється фотоелектричним модулем. Під час зміни кута повороту контролюється величина вихідного струму, а положення панелі коригується до досягнення його максимального значення. Таким чином забезпечується найбільш ефективне використання сонячного випромінювання та максимальна продуктивність фотоелектричної установки.

Для вимірювання струму в системі використовується **датчик струму**, виконаний на основі шунта. Шунт являє собою низькоомний резистивний елемент, падіння напруги на якому пропорційне струму, що протікає через сонячну батарею. Отриманий сигнал надходить до блоку керування, де здійснюється його аналіз і формуються команди для приводу механізму повороту.

Використання такого принципу керування дозволяє автоматично підтримувати оптимальну орієнтацію сонячної батареї незалежно від зміни

положення Сонця протягом дня, що сприяє збільшенню виробітку електричної енергії порівняно зі стаціонарним розміщенням фотоелектричних модулів.

Сигнал з датчика струму, виконаного на основі шунта, надходить на **підсилювач сигналу**, де здійснюється його попередня обробка та підсилення до рівня, необхідного для подальшого аналізу. Після цього сигнал подається на **аналогово-цифровий перетворювач (АЦП)**, який виконує його оцифрування та передає отримані дані до мікроконтролера.

У мікроконтролері здійснюється аналіз поточного значення струму, що генерується сонячною батареєю, та порівняння його з попередніми вимірюваннями. На основі результатів обробки формується керуючий сигнал для блоку керування кроковим двигуном.

Команди з мікроконтролера надходять до системи керування кроковим двигуном, яка забезпечує переміщення виконавчого механізму. За допомогою крокового двигуна, черв'ячної передачі та зубчастого механізму здійснюється поворот сонячної батареї у відповідному напрямку.

Після кожного переміщення фотоелектричного модуля виконується повторне вимірювання вихідного струму та його порівняння з попереднім значенням. Якщо нове значення струму перевищує попереднє, система робить висновок про правильність обраного напрямку руху та формує команду на подальший поворот панелі в тому самому напрямку на один дискретний крок. Якщо ж значення струму зменшується, система повертає панель у попереднє положення та змінює напрямок пошуку.

Завдяки такому алгоритму система автоматично підтримує положення сонячної батареї поблизу точки максимуму вихідного струму, що відповідає найбільш ефективній орієнтації фотоелектричного модуля відносно Сонця.

Для зменшення енергоспоживання приводу та кількості механічних переміщень доцільно передбачити додаткову програмну функцію. Її суть полягає в тому, що після визначення оптимального положення сонячної панелі система припиняє пошук і переходить у режим очікування на заздалегідь

встановлений проміжок часу. Після завершення цього інтервалу здійснюється повторний запуск алгоритму пошуку положення максимального струму.

Такий підхід дозволяє знизити навантаження на механічні елементи системи стеження, зменшити споживання електроенергії приводом та водночас забезпечити високу точність орієнтації сонячної батареї протягом усього світлового дня.

Для забезпечення орієнтації сонячної батареї у вертикальній площині може використовуватися аналогічна система керування, що реалізує зміну кута нахилу фотоелектричного модуля залежно від положення Сонця. Поєднання горизонтального та вертикального позиціонування дозволяє забезпечити двоосьове стеження за Сонцем і максимально ефективно використовувати сонячне випромінювання протягом світлового дня.

Для фотоелектричних систем невеликої потужності доцільним є застосування спрощених систем орієнтації, які не потребують постійного контролю параметрів роботи сонячної батареї. У таких системах керування поворотом панелей здійснюється відповідно до попередньо заданого алгоритму на основі поточного часу доби та пори року.

Основою роботи спрощеної системи є таймер або мікроконтролер із вбудованим годинником реального часу, який формує команди на переміщення сонячної батареї згідно з розрахованою траєкторією руху Сонця. Завдяки цьому відпадає необхідність у використанні датчиків освітленості або складних систем пошуку оптимального положення.

Оскільки зміна положення панелей відбувається через відносно великі проміжки часу, виконавчі механізми працюють короткочасно та споживають незначну кількість електроенергії. Це дозволяє зменшити власні енергетичні витрати системи стеження та спростити її конструкцію.

Наприклад, коригування положення сонячної батареї в горизонтальній площині може виконуватися один раз на годину, що забезпечує достатню точність орієнтації протягом дня. Водночас зміна кута нахилу у вертикальній

площині може здійснюватися значно рідше — один раз на тиждень або один раз на місяць, залежно від сезонних змін висоти Сонця над горизонтом.

Використання такого підходу дозволяє досягти прийняттого компромісу між складністю системи, витратами на її реалізацію та приростом виробітку електроенергії, що особливо актуально для автономних і малопотужних фотоелектричних установок.

Поворот сонячної батареї, як зазначалося раніше, здійснюється за допомогою механічної системи, до складу якої входять черв'ячна передача та зубчастий механізм, що приводяться в рух кроковим двигуном. Така конструкція забезпечує плавне переміщення фотоелектричних модулів і надійну фіксацію їх положення після завершення процесу орієнтації.

Як виконавчий механізм системи автоматичного позиціонування використовується **кроковий двигун**, який завдяки дискретному принципу роботи забезпечує високу точність регулювання кута повороту сонячної батареї. Використання крокового двигуна дозволяє реалізувати точне керування положенням фотоелектричних модулів без застосування складних систем зворотного зв'язку, що підвищує надійність та спрощує конструкцію системи орієнтації.

Серед основних переваг крокових двигунів слід відзначити високу точність позиціонування, простоту керування, стабільність роботи на малих швидкостях, а також можливість тривалого утримання заданого положення без додаткових механічних фіксаторів.

Для системи орієнтації фотоелектричної станції потужністю 10 кВт доцільно використовувати кроковий двигун типу NEMA 34 Stepper Motor. Даний двигун характеризується високим значенням крутного моменту, що дозволяє забезпечити надійне переміщення конструкції сонячних панелей та подолання навантажень, спричинених масою модулів і впливом вітру.

Поєднання крокового двигуна з черв'ячною передачею дозволяє додатково збільшити крутний момент на вихідному валу та підвищити точність позиціонування. Крім того, черв'ячний механізм має властивість

самогальмування, що запобігає самовільному зміщенню сонячних панелей під дією зовнішніх навантажень і сприяє зменшенню енергоспоживання системи під час утримання заданого положення.

Таким чином, використання крокового двигуна типу NEMA 34 у поєднанні з черв'ячною передачею є технічно обґрунтованим рішенням для реалізації системи автоматичної орієнтації фотоелектричної станції потужністю 10 кВт.

Рекомендований варіант - NEMA 34 Stepper Motor.

Основні характеристики:

- крутний момент: 8–12 Н·м;
- напруга живлення: 24–48 В;
- струм фази: 4–6 А;
- кут кроку: $1,8^\circ$;
- кількість фаз: 2;
- можливість підключення редуктора.

Для приводу системи автоматичного позиціонування сонячної батареї обрано кроковий двигун типу **NEMA 34** з кутом кроку $1,8^\circ$ та крутним моментом 8 Н·м. Такий двигун забезпечує необхідну точність позиціонування та достатній обертальний момент для повороту конструкції фотоелектричних модулів сонячної електростанції потужністю 10 кВт.

Передача обертального руху здійснюється через черв'ячний редуктор, який дозволяє зменшити швидкість обертання, збільшити тягове зусилля та забезпечити надійну фіксацію положення панелей після їх повороту.

Далі виконаємо розрахунок приросту потужності сонячної панелі **BST 320-60 M** за рахунок більш ефективного перетворення сонячної енергії в електричну при використанні запропонованого механізму повороту.

Електричні параметри даної сонячної батареї наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – «Електричні параметри BST 320-60 М»

Пікова електрична потужність	320 Вт
Допуск	+3 %
Номінальна напруга	24 В
Напруга в точці максимальної потужності	33,4 В
Струм у точці максимальної потужності	9,58 А
Струм короткого замикання	10,14 А
Напруга холостого ходу	41 В
Максимальна напруга системи	1000 В
Максимальний номінал запобіжника	15 А
ККД елемента ФЕМ	21,16 %
Практичний ККД модуля	19,18

Наведені технічні характеристики сонячної панелі відповідають стандартним умовам випробувань (STC): щільності сонячного випромінювання 1000 Вт/м², спектральному складу сонячного світла з повітряною масою **AM = 1,5** та температурі фотоелементів **25 °C**.

Коефіцієнт корисної дії обраного фотоелектричного модуля **BST 320-60 М** становить **19,18 %**, що характеризує частку сонячної енергії, яка перетворюється на електричну. Отже, за стандартних умов експлуатації з кожного квадратного метра поверхні сонячної панелі можна отримати певну кількість електричної потужності.

Кількість електричної енергії, що виробляється з 1 м² поверхні фотоелектричного модуля, визначається залежно від щільності сонячного випромінювання та коефіцієнта корисної дії панелі і розраховується за формулою (4.1):

$$P_1 = P_{\text{и}} \cdot \eta, \quad (4.1.)$$

де $P_{\text{в}}$ – потужність сонячного випромінювання, Вт/м²;

η – ККД сонячної батареї.

Підставивши дані з таблиці 4.1 у формулу 4.1, отримаємо таке значення:

$$P_1 = 1000 \cdot 0,1918 = 191,8 \text{ Вт}$$

Як видно з отриманого результату, за стандартних умов випробувань максимальна питома потужність, яку може виробляти обрана сонячна панель, становить **191,8 Вт/м²**. Дане значення відповідає режиму роботи, за якого поверхня фотоелектричного модуля орієнтована перпендикулярно до сонячних променів, що забезпечується завдяки застосуванню механізму автоматичного повороту.

Наочне представлення зміни потужності, що виробляється сонячною батареєю з системою стеження за Сонцем, наведено на рисунку 4.4.

Для оцінювання ефективності запропонованої системи необхідно визначити потужність, яку вироблятиме аналогічна сонячна панель за відсутності механізму повороту. У такому випадку кількість сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню фотоелектричного модуля, залежить від кута падіння сонячних променів.

Зменшення кута між напрямком сонячного випромінювання та нормаллю до поверхні панелі призводить до зниження густини енергетичного потоку на її поверхні, а відповідно — і до зменшення виробленої потужності.

Для визначення потужності сонячної батареї без системи автоматичної орієнтації скористаємося формулою (4.2), яка враховує вплив кута падіння сонячних променів на ефективність перетворення сонячної енергії в електричну. Отримані результати дадуть змогу оцінити приріст виробітку електроенергії від використання запропонованого механізму повороту сонячних панелей.

$$P_2 = P_1 \cdot \cos(\alpha), \quad (4.2)$$

де P_2 – потужність, що виробляється сонячною батареєю без механізму повороту, Вт;

$\cos[\tilde{f}_0](\alpha)$ – коригувальний коефіцієнт реальних значень відносно ідеальних.

Використовуючи формулу (4.2), розрахуємо потужність, що виробляється сонячною батареєю без механізму повороту о 17 годині.

$$P_2 = 139,055 \cdot \cos(35^\circ 43') = 112,8988 \text{ Вт.}$$

Інші значення обчислювалися аналогічним чином. Отримані дані зведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Погодинні значення потужності сонячної батареї без механізму повороту

Час, год	Потужність, Вт
5	0
6	8,2
7	35,33
8	72,95
9	112,90
10	148,11
11	170,76
12	185,36
13	191,8
14	185,36
15	170,76
16	148,11
17	112,90
18	72,95
19	35,33
20	8,22
21	0

Для наочного порівняння результатів на рисунку 4.4 наведено криві зміни потужності, що виробляється сонячною батареєю із системою автоматичного

повороту та без неї. Порівняння цих залежностей дозволяє оцінити вплив механізму орієнтації на ефективність використання сонячного випромінювання протягом світлового дня.

Крива, що відповідає сонячній батареї з механізмом повороту, характеризується підтриманням максимально можливого рівня потужності завдяки постійній орієнтації фотоелектричного модуля на Сонце. Натомість для стаціонарно встановленої панелі потужність змінюється відповідно до зміни кута падіння сонячних променів, що призводить до зниження виробітку електроенергії в ранкові та вечірні години.

Крім того, на рисунку 4.4 показано принцип визначення оптимального кута орієнтації α , за якого забезпечується максимальне значення вихідного струму та потужності фотоелектричного модуля. Процес пошуку цього кута реалізується шляхом послідовної зміни положення сонячної батареї та аналізу зміни її електричних параметрів.

Таким чином, графічне порівняння отриманих залежностей дозволяє наочно продемонструвати переваги використання системи автоматичного стеження за Сонцем та оцінити приріст виробітку електроенергії, який досягається завдяки оптимізації просторового положення фотоелектричних модулів.

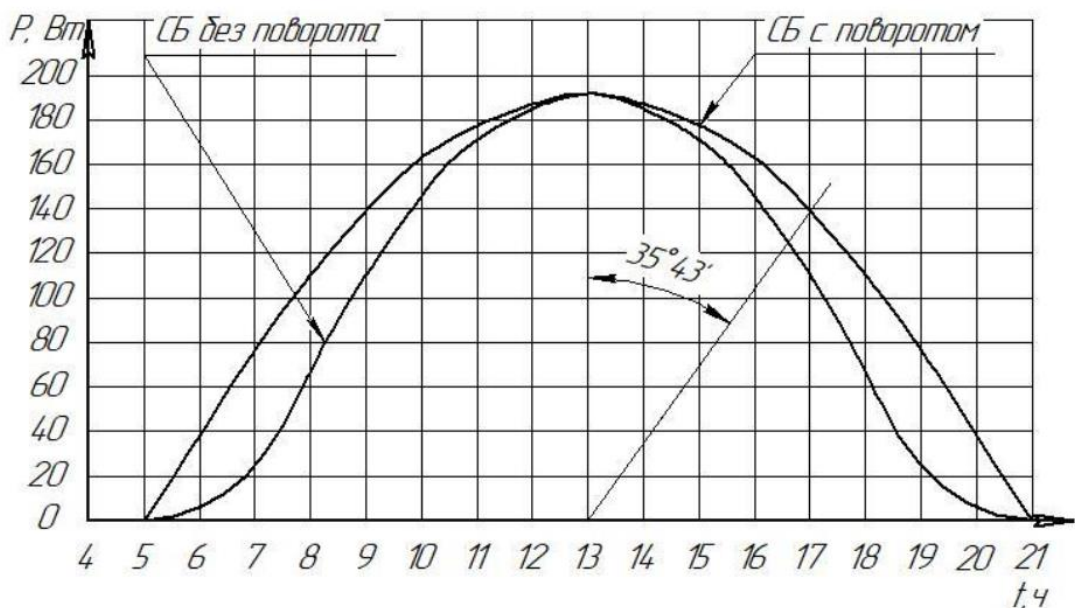


Рисунок 4.4 - Графічне порівняння потужностей сонячних батарей

Для визначення відносного приросту ефективності сонячної батареї, оснащеної механізмом автоматичного повороту, необхідно порівняти кількість електроенергії, що виробляється системами з механізмом орієнтації та без нього. З цією метою визначається площа під кривими зміни потужності протягом доби, які наведені на рисунку 4.4.

Оскільки площа під графіком залежності потужності від часу чисельно відповідає кількості виробленої електричної енергії, приріст ефективності може бути визначений шляхом порівняння площ криволінійних фігур, обмежених червоною та синьою кривими.

Площа кожної окремої трапеції визначається як середнє арифметичне значення потужності на початку та в кінці інтервалу, помножене на тривалість цього інтервалу. Сума площ усіх трапецій дозволяє визначити загальну кількість електроенергії, виробленої сонячною батареєю протягом досліджуваного періоду.

Для розрахунку площі фігури, що відповідає роботі сонячної батареї з механізмом повороту, використовується формула (4.3). З метою наочного пояснення методу апроксимації на рисунку 4.5 наведено приклад поділу частини криволінійної фігури на окремі прямокутні трапеції. Це дозволяє продемонструвати принцип визначення площі під кривою та подальшого розрахунку приросту ефективності фотоелектричної системи.

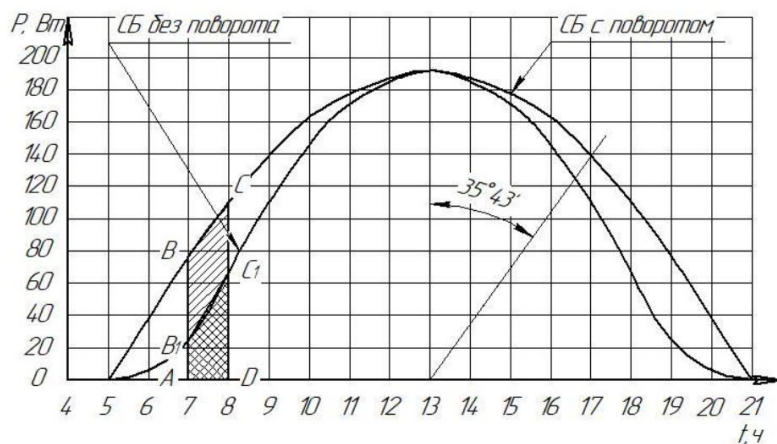


Рисунок 4.5 - Приклад апроксимації частини фігури для розрахунку

$$S_{7,8} = \frac{AB+DC}{2} \cdot AD = \frac{76,72+110,29}{2} \cdot 1 = 93,505, \quad (4.3)$$

Інші значення обчислювалися аналогічним чином. Для зручності сприйняття сумарні значення обчислень площ двох фігур були зведені в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 - Сумарні значення шуканих площ

S_1	1659.07
S_2	1975.54

Ефективність застосування батареї з механізмом повороту визначається за формулою (4.4).

$$\Xi = \frac{S_2 - S_1}{S_2} \cdot 100\% = \frac{1975,54 - 1659,07}{1975,54} \cdot 100\% = 16,02\%, \quad (4.4)$$

Загальне підвищення ефективності становило 16 %.

4.2. Технологія охолодження фотоелектричних панелей

Під час роботи фотоелектричні модулі поглинають значну частину сонячного випромінювання, унаслідок чого відбувається їх нагрівання. Підвищення температури фотоелементів негативно впливає на їхні електричні характеристики, знижуючи коефіцієнт корисної дії та загальний виробіток електроенергії. Крім того, тривала робота за підвищених температур прискорює процеси деградації матеріалів, що може призвести до скорочення терміну служби фотоелектричних модулів.

Для підтримання оптимального температурного режиму та підвищення ефективності роботи сонячних панелей застосовуються різноманітні системи охолодження. Їх використання дозволяє зменшити температурні втрати, стабілізувати роботу фотоелектричних елементів та збільшити обсяг виробленої електроенергії.

На сьогодні існує кілька основних методів охолодження фотоелектричних модулів, серед яких найбільшого поширення набули:

- повітряне охолодження;
- водяне охолодження;
- випарне охолодження.

Повітряне охолодження базується на природній або примусовій циркуляції повітря навколо фотоелектричних модулів. Цей спосіб є найбільш простим у реалізації та не потребує значних додаткових витрат.

Водяне охолодження передбачає використання трубопроводів або спеціальних теплообмінників, розташованих на тильній поверхні панелей. Циркуляція води забезпечує ефективне відведення тепла та підтримання оптимальної температури фотоелементів.

Випарне охолодження ґрунтується на використанні ефекту випаровування води з поверхні фотоелектричних модулів. У процесі випаровування відбувається поглинання теплової енергії, що сприяє зниженню температури панелей та підвищенню їх продуктивності.

Одним із найбільш поширених і технічно простих способів зниження температури фотоелектричних модулів є повітряне охолодження. Принцип його роботи ґрунтується на відведенні надлишкового тепла за рахунок природної або примусової циркуляції повітря навколо поверхні сонячних панелей.

У разі природного охолодження тепло відводиться внаслідок конвективного теплообміну між нагрітою поверхнею модуля та навколишнім повітрям. Нагріте повітря піднімається вгору, а на його місце надходять холодніші повітряні маси, забезпечуючи безперервний процес охолодження.

Для підвищення ефективності такого способу охолодження фотоелектричні модулі встановлюють на спеціальних опорних конструкціях із достатнім вентиляційним зазором між тильною поверхнею панелі та монтажною основою. Наявність повітряного проміжку сприяє покращенню циркуляції повітря та інтенсивнішому відведенню тепла від фотоелементів.

У системах примусового повітряного охолодження додатково використовуються вентилятори або інші пристрої для створення спрямованого повітряного потоку. Це дозволяє значно збільшити інтенсивність теплообміну та підтримувати нижчу робочу температуру фотоелектричних модулів навіть за умов високої сонячної активності.

До основних переваг повітряного охолодження належать простота конструкції, відносно низька вартість реалізації, відсутність необхідності використання теплоносія та мінімальні експлуатаційні витрати. Водночас ефективність такого способу значною мірою залежить від погодних умов, швидкості вітру та температури навколишнього середовища.

Завдяки простоті реалізації та високій надійності повітряне охолодження широко застосовується як у побутових, так і в промислових фотоелектричних системах для підвищення ефективності роботи сонячних панелей та збільшення терміну їх експлуатації.

Основними перевагами повітряного охолодження є простота конструкції, невисока вартість та відсутність потреби у складному додатковому обладнанні. Для його реалізації достатньо забезпечити належну вентиляцію простору під сонячними панелями. Таке рішення практично не потребує додаткових витрат на обслуговування і є досить надійним в експлуатації.

Ефективність повітряного охолодження значно підвищується за наявності природного руху повітря. Вітер сприяє швидшому відведенню тепла від поверхні панелей, що дозволяє підтримувати нижчу робочу температуру фотоелементів та покращувати їхню продуктивність.

Разом з тим можливості такого способу охолодження мають певні обмеження. У спекотні літні дні, коли температура навколишнього повітря є

високою, а швидкість вітру незначною, ефективність природного охолодження суттєво знижується. У результаті температура фотоелектричних модулів може досягати значень, за яких помітно зменшується їхній коефіцієнт корисної дії та виробіток електроенергії.

Тому для регіонів із жарким кліматом або для фотоелектричних станцій, де необхідно забезпечити максимальну продуктивність, доцільно розглядати більш ефективні способи тепловідведення. До таких рішень належать системи водяного, рідинного або комбінованого охолодження, які дозволяють значно краще контролювати температурний режим роботи сонячних панелей.

Більш ефективним, хоча й дещо складнішим у реалізації способом охолодження фотоелектричних модулів є водяне охолодження. Його принцип роботи полягає у відведенні надлишкового тепла за допомогою води або іншого теплоносія, який циркулює через систему трубок, розташованих на тильній поверхні сонячних панелей.

Під час роботи фотоелектричні модулі нагріваються під дією сонячного випромінювання, а частина поглинутої енергії перетворюється на тепло. Циркулююча рідина поглинає це тепло та відводить його від поверхні панелей, завдяки чому температура фотоелементів знижується і підтримується на оптимальному рівні.

Основною перевагою водяного охолодження є його висока ефективність. Порівняно з повітряним охолодженням вода значно краще відводить тепло, що дозволяє суттєво знизити температуру фотоелектричних модулів навіть у спекотні літні дні. Це сприяє підвищенню їхнього коефіцієнта корисної дії та збільшенню виробітку електроенергії.

Додатковою перевагою такого рішення є можливість подальшого використання нагрітої води для господарських або технологічних потреб. У цьому випадку система працює за принципом гібридної фотоелектрично-теплової установки, що дозволяє одночасно отримувати електричну та теплову енергію.

Разом з тим водяне охолодження потребує встановлення додаткового обладнання, зокрема трубопроводів, циркуляційного насоса, теплообмінника та системи контролю роботи. Це збільшує вартість системи та ускладнює її експлуатацію. Крім того, необхідно забезпечити герметичність усіх з'єднань і періодично проводити технічне обслуговування для запобігання витокам та утворенню відкладень у трубопроводах.

У таких системах вода або інший теплоносіє може циркулювати по замкненому контуру за допомогою насоса або періодично оновлюватися залежно від конструктивних особливостей системи та наявних технічних можливостей. Під час руху теплоносіє поглинає тепло, що накопичується в фотоелектричних модулях, і відводить його за межі робочої зони.

Завдяки високій теплоємності вода здатна ефективно поглинати та переносити значну кількість теплової енергії. Саме тому водяне охолодження забезпечує значно кращий тепловідвід порівняно з повітряним охолодженням. Особливо помітною ця перевага є в літній період, коли температура навколишнього середовища досягає високих значень, а природне повітряне охолодження вже не забезпечує необхідного зниження температури сонячних панелей.

Підтримання нижчої робочої температури фотоелектричних модулів дозволяє зменшити втрати потужності, викликані перегрівом, підвищити ефективність перетворення сонячної енергії в електричну та збільшити загальний виробіток електроенергії. Крім того, зниження температурного навантаження позитивно впливає на довговічність фотоелементів і сприяє уповільненню процесів їх деградації під час тривалої експлуатації.

До основних переваг водяного охолодження належить висока ефективність відведення тепла від фотоелектричних модулів. Завдяки цьому вдається підтримувати стабільний температурний режим роботи панелей навіть у періоди інтенсивного сонячного випромінювання та високих температур навколишнього середовища. Це позитивно впливає на продуктивність

фотоелектричної системи та дозволяє зменшити втрати потужності, пов'язані з перегрівом фотоелементів.

Додатковою перевагою такого способу охолодження є можливість використання нагрітої води для побутових, господарських або сільськогосподарських потреб. Таким чином, частина теплової енергії, яка зазвичай втрачається, може бути корисно використана, що підвищує загальну енергетичну ефективність системи.

Разом із тим впровадження водяного охолодження потребує встановлення додаткового обладнання, зокрема трубопроводів, насосів та елементів керування циркуляцією теплоносія. Це призводить до збільшення початкових капіталовкладень, а також потребує періодичного технічного обслуговування системи під час експлуатації.

Незважаючи на додаткові витрати, водяне охолодження вважається одним із найбільш ефективних способів підвищення продуктивності фотоелектричних установок. Особливо доцільним його застосування є в регіонах з високим рівнем сонячної інсоляції та тривалими періодами підвищених температур, де перегрів фотоелектричних модулів може суттєво знижувати їхню ефективність. У таких умовах використання водяного охолодження дозволяє забезпечити більш стабільну роботу сонячної електростанції та збільшити виробництво електричної енергії.

Ще одним перспективним способом зниження температури фотоелектричних модулів є випарне охолодження. Його принцип роботи полягає в нанесенні на поверхню сонячних панелей дрібнодисперсного водяного туману або тонкого шару води. Під час випаровування вода поглинає значну кількість теплової енергії з поверхні модулів, що сприяє їх ефективному охолодженню та зменшенню температурного навантаження.

Особливістю цього методу є використання природного процесу випаровування, який забезпечує інтенсивне відведення тепла без необхідності застосування складних теплообмінних пристроїв. Найкращі результати випарне

охолодження демонструє в регіонах із сухим і жарким кліматом, де швидкість випаровування води є високою.

Завдяки зниженню температури фотоелектричних модулів підвищується їхній коефіцієнт корисної дії та збільшується виробництво електроенергії. Крім того, вода частково очищує поверхню панелей від пилу, бруду та інших забруднень, що також позитивно впливає на ефективність роботи фотоелектричної системи.

До переваг випарного охолодження належать відносна простота реалізації, висока ефективність тепловідведення та можливість одночасного очищення поверхні фотоелектричних модулів. Водночас такий спосіб потребує постійного джерела води та додаткового обладнання для її розпилення. Також необхідно враховувати можливість утворення мінеральних відкладень на поверхні панелей при використанні води з підвищеним вмістом солей.

Незважаючи на певні обмеження, випарне охолодження є ефективним способом підтримання оптимального температурного режиму фотоелектричних модулів і може забезпечити помітне підвищення продуктивності сонячної електростанції в умовах інтенсивного сонячного випромінювання та високих температур навколишнього середовища.

При використанні рідинного охолодження особлива увага приділяється ефективному відведенню тепла від акумуляторних батарей. Для цього необхідно забезпечити інтенсивний теплообмін між елементами акумуляторної батареї та теплоносієм, що циркулює в системі охолодження. Підтримання оптимального температурного режиму сприяє підвищенню ефективності роботи акумуляторів, покращує їхні експлуатаційні характеристики та збільшує термін служби.

Коефіцієнт корисної дії кремнієвих фотоелектричних модулів залежить від їхньої робочої температури. Для більшості сучасних сонячних панелей зниження ефективності становить приблизно 0,4–0,5 % на кожен 1 °C підвищення температури понад стандартні умови випробувань, які відповідають температурі фотоелементів 25 °C. Тому перегрів сонячних

модулів є одним із факторів, що негативно впливає на виробництво електричної енергії.

Під час експлуатації сонячні панелі безперервно перебувають під впливом сонячного випромінювання, перетворюючи його енергію на електричну. Однак лише частина поглинутої енергії використовується для генерації електроенергії, тоді як решта переходить у теплову енергію, що призводить до нагрівання фотоелектричних елементів. У літній період за високої інтенсивності сонячного випромінювання температура поверхні панелей може досягати **60–80 °C**, що спричиняє помітне зниження їхньої продуктивності та збільшення втрат електроенергії.

З огляду на це, підтримання оптимального температурного режиму є важливою умовою ефективної роботи фотоелектричної станції. Для оцінки впливу температури на роботу сонячної панелі **BST 320-60 M** у таблиці 4.4 наведено основні температурні характеристики її функціонування.

Таблиця 4.4 – Температурні коефіцієнти

НОСТ - номінальна робоча температура сонячного модуля	$45 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
За потужністю ($P_{\text{макс}}$)	$-0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$
За напругою (U_{oc})	$-0,29 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$
За струмом (I_{sc})	$0,05 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$
Температура експлуатації та зберігання	$-40 \div 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Як видно з таблиці 4.4, температурний діапазон роботи сонячної панелі BST 320-60 M становить від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$. Цей температурний діапазон є однаковим для сонячних панелей різної потужності у продукції Delta.

Для того, щоб визначити можливий коефіцієнт корисної дії сонячної батареї при її перегріванні, необхідно скористатися формулою (4.5)

$$\eta_{pi} = \eta_0 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (T_{pi} - 25)), \quad (4.5)$$

де η_{pi} – КПД сонячної панелі, %;

η_0 – КПД сонячної панелі при температурі рівної 25°C, %;

T_{pi} – температура поверхності сонячної панелі, °C» [5].

У середній смузі України сонячні батареї можуть нагріватися до 70 °C, а при наближенні до екватора температура сонячних батарей може досягати навіть 90 °C.

Використовуючи формулу (4.5), можна підрахувати падіння коефіцієнта корисної дії для сонячної батареї. Підставивши дані з таблиці 4.1, отримаємо наступні значення.

При температурі панелі 45 °C

$$\eta_{pi} = 21,16 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (45 - 25)) = 19,2556 \%,$$

При температурі панелі 85 °C

$$\eta_{pi} = 21,16 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (85 - 25)) = 15,4468 \%,$$

Як видно з наведених даних, у разі підвищення температури поверхні сонячної панелі до 45 °C втрати потужності становлять близько 10 %, а при нагріванні до 85 °C вони можуть досягати 30 %. Це свідчить про суттєвий вплив температурного режиму на ефективність роботи фотоелектричних модулів.

Для відведення тепла від фотоелектричних модулів широко застосовуються радіатори охолодження, які виготовляються з матеріалів із високою теплопровідністю. Найчастіше для їх виробництва використовують алюміній та його сплави, оскільки вони поєднують хороші теплотехнічні властивості, невелику масу, корозійну стійкість і відносно невисоку вартість.

У таблиці 4.5 наведено основні матеріали, що можуть застосовуватися для виготовлення радіаторів охолодження, та відповідні значення їх

коефіцієнтів теплопровідності. Це дозволить оцінити ефективність кожного з них і обрати найбільш раціональний варіант для системи охолодження фотоелектричних модулів.

Таблиця 4.5 – Теплопровідність різних матеріалів

Матеріал	λ , (Вт/м · К)
Срібло	407
Мідь	384
Золото	308
Алюміній	209
Бронза	47–58
Тепловідвідний пластик	1–40
Пластмаса	0,1

Як видно з таблиці 4.5, найбільш теплопровідним металом є срібло.

Аналіз теплофізичних характеристик матеріалів показує, що для ефективного відведення тепла не завжди доцільно використовувати матеріали з максимально можливим коефіцієнтом теплопровідності. Практичні дослідження свідчать, що ефективне значення коефіцієнта теплопровідності матеріалу радіатора $\lambda_{\text{еф}}$ знаходиться в межах 5–10 Вт/(м·К).

Радіатори, виготовлені зі спеціальних теплорозсіювальних пластмас, можуть ефективно використовуватися в системах пасивного повітряного охолодження. Завдяки своїм теплофізичним властивостям вони забезпечують достатнє відведення тепла від нагрітих поверхонь без застосування додаткових засобів примусової вентиляції, таких як вентилятори або інші допоміжні пристрої.

У даній роботі розглядається не лише відведення надлишкового тепла від фотоелектричних модулів, а й можливість його подальшого корисного використання. Такий підхід дозволяє підвищити загальну енергетичну ефективність системи за рахунок утилізації теплової енергії, яка в традиційних системах охолодження безповоротно розсіюється в навколишнє середовище.

На рисунке 4.6 представлена функциональная схема защиты солнечной батареи от перегрева.

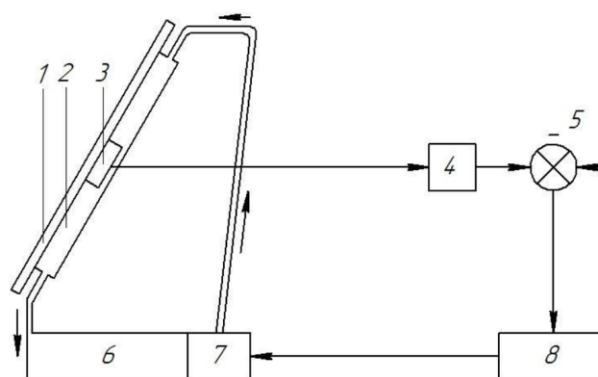


Рисунок 4.6 - Функціональна схема захисту сонячної батареї від перегріву

На рисунку 4.6 зображено:

- 1 – сонячна батарея,
- 2 – радіатор,
- 3 – датчик температури,
- 4 – підсилювач сигналу,
- 5 – пристрій порівняння,
- 6 – бак з охолоджувальною рідиною,
- 7 – циркуляційний насос,
- 8 – система керування циркуляційним насосом

На рисунку 4.7 показано приклад розміщення датчика температури на радіаторі.

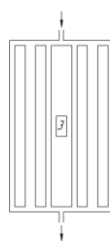


Рисунок – 4.7 - Приклад розміщення датчика температури

Контроль температурного режиму роботи сонячної батареї здійснюється за допомогою датчика температури (3), який формує електричний сигнал, пропорційний температурі фотоелектричного модуля (1). Отриманий сигнал надходить на підсилювач (4), де відбувається його підсилення до рівня, необхідного для подальшої обробки.

Після цього сигнал подається на пристрій порівняння (5), в якому здійснюється його зіставлення з опорним сигналом, що задає допустиме значення температури.

Система керування подає команду на запуск приводу циркуляційного насоса (7), що забезпечує подачу охолоджувальної рідини із накопичувального бака (6) до верхнього патрубку радіатора (2).

Функціональну схему для перевірки тестового зразка можна зібрати з компонентів, наведених у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Компоненти функціональної схеми захисту сонячної батареї від перегріву

Датчик температури	K1019EM1
Циркуляційний насос	K-9.04-24

На рисунках 4.8 і 4.9 показано вибрані компоненти.



Рисунок 4.8 - Датчик температури K1019EM1



Рисунок 4.9 - Циркуляційний насос K-9.04-24

Застосування системи охолодження дозволяє суттєво зменшити негативний вплив підвищеної температури на роботу фотоелектричних модулів. У періоди інтенсивного сонячного випромінювання, коли температура поверхні сонячних панелей може досягати **85 °C**, використання охолодження сприяє зниженню температурних втрат і підвищенню ефективності перетворення сонячної енергії в електричну.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Організація охорони праці та захисту навколишнього середовища на підприємстві здійснюється відповідно до вимог законодавства України, зокрема Законів України «Про охорону праці» та «Про охорону навколишнього природного середовища». Виконання вимог зазначених нормативно-правових актів спрямоване на забезпечення безпечних умов праці, збереження здоров'я працівників, запобігання виробничому травматизму та мінімізацію негативного впливу діяльності підприємства на довкілля.

5.1. Фактори, що підлягають урахуванню при використанні захисних заходів з електробезпеки

Під час вибору та застосування засобів захисту від ураження електричним струмом необхідно враховувати основні параметри електроустановок, зокрема номінальну напругу, рід струму, його частоту, а також особливості системи електропостачання. Від правильного врахування цих факторів залежить ефективність заходів електробезпеки та рівень захисту персоналу.

Одним із найважливіших чинників є спосіб електропостачання об'єкта. Він включає такі характеристики, як вид струму (постійний або змінний), конфігурація електричної мережі (однофазна або трифазна), рівень напруги та частота струму. Кожен із цих параметрів впливає на вибір захисних пристроїв, засобів індивідуального захисту та організацію безпечної експлуатації електрообладнання.

Залежно від виду струму застосовуються різні підходи до забезпечення електробезпеки. Постійний і змінний струм мають різний вплив на організм людини, тому вимоги до захисних засобів та обладнання можуть відрізнятися. Особливу увагу необхідно приділяти електроустановкам змінного струму промислової частоти, які є найбільш поширеними на виробничих об'єктах.

Важливим фактором також є конфігурація системи електропостачання. В однофазних і трифазних мережах використовуються різні схеми підключення обладнання, що впливає на характер можливих аварійних режимів та способи захисту від ураження електричним струмом. Тому при проєктуванні та експлуатації електроустановок необхідно передбачати відповідні технічні та організаційні заходи безпеки.

Під час організації заходів з електробезпеки важливо також враховувати стійкість електроустановок до перепадів напруги, коротких замикань та інших аварійних режимів роботи. У деяких системах електропостачання існує підвищена ймовірність виникнення перенапруг, перевантажень або електромагнітних перешкод, що може призвести до виходу з ладу обладнання, порушення технологічних процесів або створення небезпечних умов для персоналу.

Важливим фактором при виборі засобів захисту є також номінальна напруга електроустановок. Залежно від рівня напруги розрізняють установки низької, середньої та високої напруги, кожна з яких потребує застосування відповідних заходів безпеки та спеціалізованих засобів індивідуального захисту.

Під час виконання робіт в електроустановках високої напруги персонал повинен використовувати діелектричні рукавички, боти, ізолювальні штанги, покажчики напруги та інші засоби захисту, що відповідають встановленим вимогам безпеки. У деяких випадках можуть застосовуватися спеціальні захисні костюми, призначені для роботи поблизу струмовідних частин, які перебувають під високою напругою.

Ще одним важливим чинником, який необхідно враховувати під час вибору та застосування заходів електробезпеки, є режим нейтралі електричної мережі. Від способу заземлення нейтралі значною мірою залежать умови експлуатації електроустановок, рівень електробезпеки персоналу та ефективність роботи захисних пристроїв.

Заземлення нейтралі застосовується для підвищення безпеки електричних систем, забезпечення стабільної роботи обладнання та зменшення ризику ураження людей електричним струмом. Крім того, воно сприяє своєчасному виявленню пошкоджень ізоляції та виникненню струмів замикання на землю, що дозволяє оперативно відключати аварійні ділянки мережі.

В окремих випадках, особливо на старих промислових об'єктах або в спеціалізованих електротехнічних системах, можуть експлуатуватися мережі з ізолюваною нейтраллю або зі специфічними схемами заземлення. Такі системи мають інші умови проходження аварійних струмів, що впливає на принципи роботи захисних пристроїв та організацію заходів електробезпеки.

За відсутності належного заземлення або при використанні неефективної системи захисту значно ускладнюється контроль аварійних режимів роботи електроустановок, зростає ризик ураження персоналу електричним струмом, а також підвищується ймовірність пошкодження електрообладнання.

Правильно виконане заземлення нейтралі є важливою умовою безпечної та надійної роботи електроустановок. Воно сприяє зниженню ризику виникнення небезпечних перенапруг, забезпечує стабільність режимів роботи електричної мережі та підвищує ефективність функціонування систем електрозахисту.

Під час експлуатації електрообладнання важливо враховувати вплив режиму заземлення нейтралі на роботу електричних мереж, захисних пристроїв та ізоляційних матеріалів. Від способу заземлення нейтралі залежить характер розподілу напруг у мережі, величина струмів замикання на землю та ефективність спрацювання систем електрозахисту.

Важливим чинником, який необхідно враховувати під час вибору та застосування заходів електробезпеки, є вид виконання електроустановки. Залежно від умов експлуатації електроустановки можуть бути **стаціонарними, пересувними або переносними**, причому кожен із цих типів має свої особливості конструкції, режиму роботи та вимоги до забезпечення безпеки.

Стаціонарні електроустановки – це електроустановки, які монтуються на постійному місці експлуатації та не передбачають переміщення під час роботи. До таких установок належать електричні мережі житлових, адміністративних і виробничих будівель, трансформаторні підстанції, розподільчі пристрої, електростанції та інші об'єкти енергетичної інфраструктури.

Пересувні електроустановки – це електроустановки, які можуть змінювати місце свого розташування, проте під час виконання робіт зазвичай функціонують на визначеному майданчику або об'єкті. До таких установок належать пересувні дизельні та бензинові електрогенератори, мобільні електростанції, електротехнічні комплекси на транспортних засобах, а також інше обладнання, призначене для тимчасового електропостачання.

Переносні електроустановки – це електротехнічні пристрої та обладнання, які завдяки своїм конструктивним особливостям можуть легко переноситися та використовуватися в різних місцях виконання робіт. До таких установок належать ручні електроінструменти, переносні світильники, мобільні зарядні пристрої, переносні генератори, електровимірювальні прилади та інше обладнання.

Можливість наближення до струмовідних частин є одним із найважливіших факторів, який необхідно враховувати під час проєктування, експлуатації та організації заходів електробезпеки. Безпосередній або випадковий контакт людини зі струмовідними частинами, що перебувають під напругою, може призвести до тяжких наслідків, включаючи ураження електричним струмом, опіки та інші виробничі травми.

Характер виконуваних робіт та частота доступу до електрообладнання суттєво впливають на рівень ризику наближення персоналу до струмовідних частин. Чим частіше працівники взаємодіють з електроустановками під час обслуговування, налагодження або ремонту, тим вищою є ймовірність виникнення небезпечних ситуацій, пов'язаних із випадковим контактом зі струмовідними елементами.

Умови експлуатації електрообладнання також суттєво впливають на рівень електробезпеки та ризик наближення працівників до струмовідних частин. Підвищена вологість повітря, значні коливання температури, наявність пилю, агресивних хімічних речовин або інших несприятливих факторів можуть погіршувати стан ізоляції електрообладнання та підвищувати ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

Із можливості наближення людини до струмовідних частин безпосередньо впливає характер можливого контакту з електричним колом. Цей фактор є одним із ключових під час оцінювання рівня електробезпеки, оскільки визначає потенційні ризики для персоналу та впливає на вибір відповідних засобів і заходів захисту.

Залежно від умов експлуатації електроустановок розрізняють **прямий** та **непрямий (опосередкований)** дотик до струмовідних частин. Прямий дотик виникає у випадку безпосереднього контакту людини зі струмовідними елементами, які перебувають під напругою. Така ситуація є особливо небезпечною, оскільки електричний струм може проходити через тіло людини, викликаючи електротравми різного ступеня тяжкості.

Непрямий або опосередкований дотик відбувається тоді, коли людина контактує з металевими корпусами електрообладнання, конструктивними елементами або іншими провідними частинами, які внаслідок пошкодження ізоляції або аварійного режиму опинилися під напругою. Незважаючи на те, що такий контакт є непрямим, він також становить серйозну небезпеку для життя та здоров'я людини.

Під час оцінювання небезпеки ураження електричним струмом важливе значення має не лише сам факт контакту людини зі струмовідними частинами, але й **тривалість такого контакту**. Чим довше електричний струм проходить через організм людини, тим вищою є ймовірність виникнення тяжких наслідків, зокрема порушення роботи серцево-судинної та дихальної систем, опіків тканин або навіть летального випадку.

Можливість зняття напруги зі струмовідних частин є одним із найважливіших факторів, який необхідно враховувати під час організації заходів електробезпеки. Цей захід має вирішальне значення для забезпечення безпечних умов праці під час технічного обслуговування, ремонту, налагодження та інших робіт, пов'язаних з експлуатацією електрообладнання.

Основною метою зняття напруги є усунення ризику ураження працівників електричним струмом. Перед початком виконання будь-яких робіт на електроустановках необхідно повністю відключити їх від джерела живлення, перевірити відсутність напруги та вжити заходів щодо унеможливлення її випадкової подачі. Особливо важливими такі вимоги є під час виконання робіт в електроустановках середньої та високої напруги.

Під час розроблення та застосування заходів електробезпеки необхідно враховувати характер виконуваних робіт, оскільки кожен їх вид пов'язаний із певними небезпеками та потребує відповідних засобів захисту. Основними видами робіт, під час яких особливу увагу приділяють питанням електробезпеки, є монтаж, налагодження та експлуатація електрообладнання.

Монтажні роботи пов'язані з установленням електрообладнання, прокладанням кабельних ліній, виконанням електричних з'єднань та підключенням обладнання до мережі електропостачання. На цьому етапі важливо забезпечити безпеку не лише процесу монтажу, але й подальшої експлуатації електроустановки.

Під час монтажу необхідно дотримуватися вимог нормативних документів щодо виконання електромонтажних робіт, правильно організовувати системи заземлення та занулення, забезпечувати належну ізоляцію струмовідних частин і використовувати сертифіковані матеріали та комплектувальні вироби. Особлива увага приділяється якості електричних з'єднань, оскільки їхня неналежна реалізація може стати причиною перегріву, коротких замикань або виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

Другим видом робіт є налагодження електрообладнання. Під час виконання налагоджувальних робіт працівники здійснюють перевірку

працездатності окремих вузлів і систем, налаштування параметрів роботи обладнання, випробування електричних кіл та контроль правильності функціонування захисних пристроїв. Особливістю цього етапу є те, що частина робіт може виконуватися на обладнанні, яке перебуває під напругою, що підвищує вимоги до дотримання правил електробезпеки.

Під час налагодження необхідно забезпечити справність усіх захисних засобів та пристроїв, перевірити роботу систем заземлення, автоматичного захисту та аварійного відключення. Працівники повинні використовувати засоби індивідуального захисту, дотримуватися затверджених інструкцій з охорони праці та виконувати роботи відповідно до встановленого порядку. Особлива увага приділяється контролю параметрів електричної мережі та запобіганню виникненню аварійних режимів роботи обладнання.

Третім видом робіт є експлуатація електрообладнання. Експлуатація являє собою тривалий процес використання електроустановок, під час якого необхідно підтримувати їхній технічний стан на належному рівні та забезпечувати безпечні умови праці для персоналу.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз конструкції, принципів роботи та особливостей експлуатації сучасних фотоелектричних станцій. Розглянуто основні складові фотоелектричної системи, їх призначення та взаємодію в процесі перетворення сонячної енергії в електричну.

Досліджено фактори, що впливають на ефективність роботи фотоелектричних модулів, зокрема рівень сонячного випромінювання, температуру навколишнього середовища, кут нахилу панелей, їх орієнтацію відносно Сонця, забруднення поверхні та технічний стан обладнання.

Виконано аналіз сучасних методів підвищення продуктивності фотоелектричних систем. Встановлено, що найбільш ефективними заходами є застосування систем автоматичного позиціонування сонячних панелей та використання систем охолодження фотоелектричних модулів.

Для підвищення ефективності фотоелектричної станції потужністю 10 кВт розроблено систему автоматичної орієнтації сонячних панелей відносно положення Сонця. Запропонована система забезпечує підтримання оптимального кута падіння сонячних променів на поверхню фотоелектричних модулів протягом світлового дня, що дозволяє збільшити виробіток електричної енергії.

Проведено оцінку ефективності застосування механізму повороту сонячних панелей. Результати розрахунків показали, що використання системи стеження за Сонцем забезпечує приріст виробництва електроенергії приблизно на 16 % порівняно зі стаціонарним розміщенням модулів.

Запропоновано систему охолодження фотоелектричних модулів із використанням теплоносія та радіаторного теплообмінника. Застосування такої системи дозволяє знизити робочу температуру фотоелектричних елементів, зменшити температурні втрати потужності та підвищити ефективність перетворення сонячної енергії.

Встановлено, що при підвищенні температури фотоелектричних модулів до 85 °С втрати потужності можуть досягати 30 %. Використання системи охолодження дає можливість суттєво знизити ці втрати та підтримувати більш сприятливий температурний режим роботи фотоелектричної станції.

Додатковою перевагою запропонованої системи охолодження є можливість утилізації відведеного тепла для господарсько-побутових потреб, що дозволяє підвищити загальний коефіцієнт використання сонячної енергії та покращити техніко-економічні показники станції.

У розділі охорони праці проаналізовано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори під час експлуатації фотоелектричних систем, розглянуто заходи електробезпеки та вимоги до безпечного виконання монтажних, налагоджувальних і експлуатаційних робіт.

Результати проведених досліджень і розрахунків підтверджують технічну доцільність упровадження запропонованих заходів з удосконалення фотоелектричної станції потужністю 10 кВт. Реалізація системи автоматичного позиціонування та охолодження фотоелектричних модулів забезпечує підвищення продуктивності станції, покращення енергетичних показників та більш ефективне використання сонячної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sreega R. Nithyananthan D., Nandhini B. Design and development of automated solar panel cleaner and cooler // IJEEE. 2017. V.9, № 2. P. 127-138.
2. Types of Solar Panels: веб-сайт. URL: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels>
3. Шелешей Т.В. Сучасні технології фотоелектричних перетворювачів. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 250 с.
4. Яцків Я.С. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні. Львів: Національна академія наук України, 2019. 320 с.
5. Климко В.І. Концентраторні фотоелектричні системи: принципи та застосування. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. 280 с.
6. Денисова А.Є. Моніторинг та діагностика фотоелектричних систем. Одеса: ОНПУ, 2020. 200 с.
7. Лисенко О.В. Спектральні характеристики фотоелектричних перетворювачів. Київ: Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, 2019. 180 с.
8. Мисак Й.С. Деградація та надійність фотоелектричних модулів. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2020. 240 с.
9. Muraveva V. Research on the use of solar power plants as an alternative source of electricity in the city of Komsomolsk-on-Amur // Start in science. – 2017. – № 3. – С. 48-51; URL: <http://sciencestart.ru/ru/article/view?id=631> (Last accessed: 23.09.2018)
10. Solar energy: [Electronic resource] - Access mode: <http://www.rea.org.ua/dieret/Solar/solar.html#PHOTOVOLTAICS>
11. Тимченко Л.І. Перовскітні та органічні фотоелектричні перетворювачі. Київ: Інститут фізики НАН України, 2021. 200 с.
12. Федірко П.П. Оптимізація структури та матеріалів фотоелектричних елементів. Чернівці: Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, 2019. 260 с.

13. Гелету́ха Г.Г. Міжнародне співробітництво у розвитку фотоелектричної енергетики. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2020. 280 с
14. Шаповал І.М. Інтеграція фотоелектричних систем у будівлі та транспортні засоби. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2021. 240 с.
15. Мережева сонячна електростанція "під ключ" Medium на 10 кВт : вебсайт. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-power-plants/topova10kwt>
16. Шульга Ю.І. Системи зберігання енергії для фотоелектричних станцій. Київ: Інститут загальної енергетики НАН України, 2019. 300 с.
17. Білорус В.С. Державна підтримка розвитку сонячної енергетики в Україні. Київ: Національний інститут стратегічних досліджень, 2021. 200 с.
18. Возняк О.Т. Освітні аспекти впровадження фотоелектричних технологій. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2019. 220 с.
19. Кравченко В. І. Моніторинг та діагностика фотоелектричних систем. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 180 с.
20. Марченко О. В. Методи підвищення ефективності фотоелектричних установок. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. 240 с.
21. Шульц А. С. Оптимізація роботи фотоелектричних станцій за допомогою систем моніторингу. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 200 с.
22. Кузнецов В. М. Інноваційні технології в сонячній енергетиці. Одеса: Екологія, 2022. 300 с.
23. Гончаренко А. В. Аналіз даних в системах моніторингу фотоелектричних установок. Суми: СумДУ, 2021. 180 с.
24. Ткаченко С. М. Застосування штучного інтелекту в управлінні фотоелектричними системами. Вінниця: ВНТУ, 2020. 220 с.

25. Мельник О. В. Діагностика та оптимізація фотоелектричних систем. Чернігів: ЧНТУ, 2019. 280 с.
26. Коваленко О. П. Моніторинг та контроль якості електроенергії в фотоелектричних установках. Херсон: ХНТУ, 2022. 320 с.
27. Савченко В. А. Інформаційно-вимірювальні системи для моніторингу фотоелектричних станцій. Запоріжжя: ЗНТУ, 2021. 200 с.
28. Analysis of Solar Photovoltaic System Shading: веб-сайт. URL: <https://de.mathworks.com/help/sps/ug/solar-shading.html>
29. Бондаренко В. І., Шульга Ю. І. Оптимізація роботи фотоелектричних станцій. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. 180 с.
30. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України / Кудря С.О., Яценко Л.В., Душина Г.П. и др // НАНУ: Інститут електродинаміки. – Київ, 2001. – 42 с.
31. Довідкова книга по техніці безпеки в енергетику (в 2-х книгах за редакцією П. А. Доліна) М. Енергія ,1978м-608с.
32. Охорона праці в електроустановках. Книга для Вузів за редакцією Князевського Б. А. 3-і видання, перероблене й доповнене. М. Енерговид , 1983м-336с.
33. Березуцький В.В Основи охорони праці. –Харків: Факт, 2005.
34. Правила улаштування електроустановок. 5-те вид. перероб. Й доп.-Х: 2016 р, Затв. Наказ Мін. Енергетики та вугільної промисловості України від 20.06.2014 р. №269.
35. НАПБ Б. 03.002-2007 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою. Наказ МНС від 03.12.2007 р. №6883.
36. ДБНВ 1.1-7-02. – Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
37. ДСТУ В 2.5.–38: 2008 Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель та споруд. Діє з 01.01.2009.