

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми
навчання освітнього ступеня «Магістр»,
освітньо-професійної програми
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

_____ **Віктор ШЕРШУН**

Керівник: канд. техн. наук, доцент

_____ **Павло ПОТАПСЬКИЙ**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

« ____ » _____ 2025 р.

Гарант освітньої програми

«Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент _____ **Павло ПОТАПСЬКИЙ**

м. Кам'янець-Подільський, 2025р.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	5
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КЛЮЧОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ (СЕС)	10
1.1 Фотоелектричні елементи та модулі	10
1.2 Теплові сонячні установки.....	22
1.3 Засоби та методи енергозбереження	34
Висновок до розділу 1	45
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТНІ РОЗРАХУНКИ КОЛЕКТОРІВ ТА ФОТОМОДУЛІВ	48
2.1 Географія розташування та характеристика об’єкта.....	48
2.2 Регіональні умови клімату.....	49
2.3 Основа вибору сонячного колектора. Обчислення ефективності	51
2.4 Визначення необхідної кількості сонячних колекторів на основі характеристик потреби господарства.....	53
2.5 Визначення потреби у сонячній електрогенерації та підбір типу і кількості панелей	56
2.6 Визначення потужностей, які необхідні господарству та обрання відповідного інвертора.....	58
2.7 Математичне моделювання гібридної сонячної електростанції.....	60
Висновок до розділу 2	65
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ТА РОЗРАХУНОК НАКОПИЧУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ.....	67
3.1 Визначення необхідного об’єму зберігання електроенергії	67
3.2 Вибір найбільш ефективної технології для зберігання електроенергії.....	69
3.3 Розрахунок об’ємів необхідної теплової енергії	71

3.4 Реалізація схем підключень всього обладнання.....	71
Висновок до розділу 3.....	73
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КОГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА СОНЯЧНІЙ ОСНОВІ.....	75
4.1 Ключова ідея проєкту	75
4.2 Дослідження ринкової конкуренції.....	76
4.3 Аналіз тарифів, обчислення доцільності проєкту	77
4.4 Витратні обчислення.....	78
4.5 Визначення термінів окупності запропонованої системи.....	80
4.6 Визначення економічної доцільності встановлення сонячних колекторів ...	82
4.7 Економічна доцільність гібридної системи	83
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ В КОМПЛЕКСНІЙ СИСТЕМІ КОГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА СОНЯЧНОМУ ВИПРОМІНЮВАННІ.....	84
5.1 Правила безпеки під час монтажу сонячних панелей. Робота на висоті.....	84
5.2 Правила що до подальшої експлуатації системи електроживлення	85
5.3 Техніка безпеки при роботі з інверторами та акумуляторними батареями ..	86
5.4 Правила безпеки щодо коректного монтажу акумуляторних батарей. Їх умови зберігання	88
5.5 Інформація що до правильного використання інверторів та акумуляторних батарей	89
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК.....	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	93
ДОДАТКИ	

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків до розділів, загального висновку та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи 96 сторінок, рисунки, таблиці, список використаних джерел та додатки.

Актуальність теми. Сучасні тенденції розвитку енергетики свідчать про зростання інтересу до відновлюваних джерел енергії, серед яких сонячна енергія є найбільш доступним і екологічно безпечним ресурсом для приватних домогосподарств. Впровадження комбінованих систем, що включають дахові фотомодулі та сонячні колектори, дозволяє істотно зменшити залежність від централізованих мереж електропостачання, що набуває особливого значення в умовах кризових ситуацій та надзвичайних обставин.

Мета дослідження. Основною метою цієї роботи є розробка та визначення технічних параметрів інтегрованої системи тепло- та електропостачання на основі сонячних колекторів та дахової сонячної електростанції. Запропонована система має забезпечувати раціональне використання енергії, зменшення споживання традиційних джерел та наявність резервного живлення у разі тимчасового відключення централізованої електромережі.

Об'єкт дослідження. Об'єктом даного дослідження є процеси отримання, перетворення та накопичення енергії з відновлюваних джерел у локальних комплексних системах енергозабезпечення.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є вибір компонентів та визначення оптимальних параметрів комплексної системи тепло- та електропостачання, що поєднує сонячні колектори та дахову сонячну електростанцію, з метою забезпечення автономності та резервування електроенергії для домогосподарств.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у розробці інженерних і технічних рішень для інтегрованої системи, яка включає дахову сонячну електростанцію та підсистему акумулювання енергії, здатну

забезпечувати стабільне резервне живлення домогосподарства навіть у разі тривалого аварійного відключення електропостачання.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, ДАХОВІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ, ТЕПЛОВІ КОЛЕКТОРИ, АКУМУЛЯТОРИ, ЛОКАЛЬНІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ, АВТОНОМНЕ ЖИВЛЕННЯ, ІНТЕГРОВАНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ РІШЕННЯ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

PV – Photovoltaic – фотомодуль, сонячна панель для генерації електроенергії;

SC – Solar Collector – сонячний колектор;

AC – Alternating Current – змінний струм;

DC – Direct Current – постійний струм;

ESS – Energy Storage System – система акумулювання енергії;

SOC – State of Charge – рівень заряду батареї (%);

ПЗіП – пристрій захисту від імпульсної перенапруги ;

RH – відносна вологість ;

ПДВ – Податок на додану вартість ;

НКРЕКП – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг;

G – Solar irradiance – сонячна радіація (Вт/м²);

PVsys – Photovoltaic system – фотогальванічна система;

UPS – Uninterruptible Power Supply – джерело безперебійного живлення;

BMS – Battery Management System – система управління батареями;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ВСТУП

На сьогоднішній день переважний обсяг енергетичних ресурсів у світі отримується за рахунок інтенсивного застосування викопних джерел енергії. З кожним роком накопичується дедалі більше наукових підтверджень того, що глобальне підвищення температури та пов'язані з ним кліматичні зміни мають антропогенну природу й безпосередньо обумовлені широкомасштабним використанням палив викопного походження. Надмірна орієнтація сучасного енергетичного сектору на такі ресурси призвела до того, що у 2017 році їхнє середньодобове споживання досягло приблизно 98,2 мільйона барелів нафтового еквівалента. Слід підкреслити, що частка викопного палива становить орієнтовно 75% у загальному світовому балансі споживання енергії, тоді як на відновлювані джерела припадає лише близько 25%. Унаслідок цього щорічно в атмосферу потрапляє приблизно 36,8 мільярда тонн вуглекислого газу, що виділяється під час виробництва енергії у глобальному масштабі. Спостереження засвідчують, що концентрація CO₂, спричинена діяльністю людства, зросла майже на чверть за останні сто років, що безпосередньо пов'язано зі збільшенням середньорічної температури планети.

З метою пом'якшення впливу цих негативних тенденцій, крім модернізації та підвищення ефективності вже існуючих енергетичних систем, необхідно активніше розгортати місцеві відновлювані джерела енергії. Попри те, що на даному етапі коефіцієнт корисної дії таких установок залишається порівняно невисоким, а вартість їх впровадження ще доволі значна, величезний енергетичний потенціал сонячного випромінювання, яке безперервно досягає Землі, робить застосування сонячних панелей економічно виправданим і перспективним. Варто звернути увагу, що стрімке зростання зацікавленості у відновлюваній енергетиці протягом останніх років спричинило суттєве вдосконалення технологічних процесів виготовлення фотоелектричних елементів. Різке зниження вартості обладнання та одночасне підвищення його продуктивності забезпечили зростання економічної привабливості таких систем, що своєю чергою сприяло помітному збільшенню встановлених потужностей у

всесвітньому масштабі [1]. За прогнозами, у період до 2027 року сумарна потужність сонячних фотоелектричних станцій перевищить показники вугільної генерації та стане найбільшою серед усіх доступних джерел енергії. Очікується, що загальний обсяг встановлених сонячних електростанцій майже утричі зросте, збільшившись приблизно на 1500 ГВт, перевищивши газову генерацію вже у 2026 році, а вугільну — у 2027 році. Щорічний приріст фотоелектричних потужностей зберігатиме тенденцію до постійного зростання протягом наступних чотирьох років [2].

Фотоелектричні модулі, не маючи у своєму складі рухомих складових, відзначаються довговічністю та стабільністю роботи, а їх середній експлуатаційний ресурс зазвичай сягає близько 25 років, без потреби у значних витратах на технічне обслуговування.

Сонячні теплові колектори також демонструють високу результативність і призначені для перетворення сонячного випромінювання у теплову енергію шляхом його поглинання. Подібні установки ефективно акумулюють сонячну радіацію, що являє собою електромагнітне випромінювання, у спектрі якого присутні інфрачервоні та ультрафіолетові хвилі. Такий процес стає можливим завдяки колосальній кількості сонячної енергії, що щоденно досягає земної поверхні. Незважаючи на те, що популярність цих систем значно поступається фотоелектричним панелям, сонячні теплові колектори можуть бути не менш ефективними при забезпеченні об'єктів гарячим водопостачанням. Водночас їхня конструкція може бути складнішою у порівнянні з іншими видами сонячних установок [3].

Публікації: Віктор ШЕРШУН / Підвищення ефективності енергогенерації шляхом поєднання теплової та електричної енергії від сонячного випромінювання // V Всеукраїнська студентська науково-практична конференція «Ефективне використання енергії: стан і перспективи» (12 листопада 2025 року) / Заклад вищої освіти «Подільський державний університет». Кам'янець – Подільський. 2025.

РОЗДІЛ 1. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КЛЮЧОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ (СЕС)

Сонячні енергетичні системи, призначені для приватних домогосподарств, характеризуються певними технічними та конструктивними обмеженнями, тому під час добору обладнання особливу увагу слід приділяти тим варіантам, які забезпечують максимально можливу продуктивність і є найбільш виправданими для застосування у житлових будівлях та побутових умовах.

До ключових складових, що визначають загальну результативність функціонування домашньої сонячної електростанції та представлені на ринку у значній кількості модифікацій, належать такі групи обладнання, як фотогальванічні панелі, системи сонячних теплових колекторів, а також акумуляторні накопичувачі енергії, які відповідають за збереження виробленої електроенергії та стабільність роботи установки.

1.1 Фотоелектричні елементи та модулі

Сонячні фотомодулі застосовуються для акумулювання енергії сонячного випромінювання та подальшого її перетворення на електричну енергію. Типовий модуль формується з окремих фотоелектричних елементів, кожен із яких виготовляється із шарів кремнію, бору та фосфору. Шар бору створює область із позитивним зарядом, фосфор забезпечує негативний заряд, а кремнієва підкладка виконує функцію напівпровідникового матеріалу [4]. Усі ФЕМ складаються з множини комірок, кількість яких у стандартній панелі зазвичай становить 60, 72 або 96 одиниць. Декілька фотомодулів, з'єднаних у послідовний ланцюг, утворюють так званий стрінг. Масив фотоелектричних панелей являє собою групу модулів, які об'єднані паралельним з'єднанням з метою отримання необхідної потужності [5]. На рисунку 1.1 продемонстровано основні елементи такого масиву.

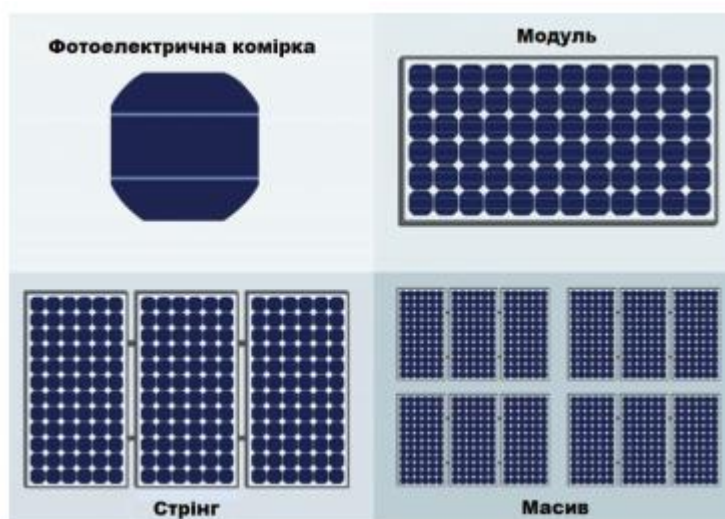


Рисунок 1.1- Масив фотоелектричних панелей.

Коли потік сонячних фотонів досягає поверхні фотоелектричного модуля, вони вибивають електрони з шаруватої кремнієвої структури, спрямовуючи їх у створене елементами електричне поле. У результаті формується впорядкований рух електронів, тобто електричний струм, який у подальшому трансформується в корисну електроенергію. На рисунку 1.2 представлено спрощену схему будови кремнієвого фотоелектричного модуля.

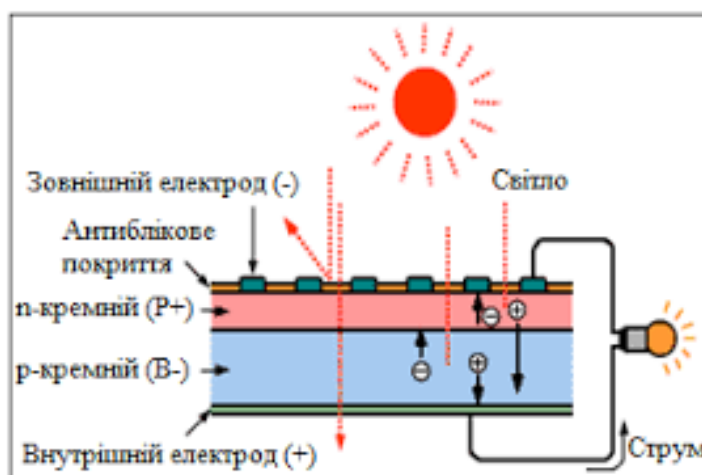


Рисунок 1.2 - Спрощена схема будови кремнієвого фотоелектричного модуля.

Попри те, що модулі можуть класифікуватися за значною кількістю технічних критеріїв, на сучасному ринку найчастіше пропонуються чотири основні категорії сонячних панелей: монокристалічні, полікристалічні, модулі типу PERC, а також тонкоплівкові фотоелементи.

Сонячні панелі типу монокристал

Монокристалічні сонячні панелі належать до одного з найпоширеніших та високоефективних типів фотогальванічних елементів, що використовуються для перетворення сонячної енергії у електричну. Основним матеріалом для їх виготовлення є високочистий монокристалічний кремній, який характеризується однорідною кристалічною структурою без меж зерен. Саме ця структурна особливість забезпечує підвищену електропровідність, стабільність параметрів та ефективну конверсію сонячного випромінювання.

Процес виготовлення монокристалічного кремнію є складним та енергозатратним. Зазвичай застосовується метод Чохральського, при якому із розплавленого кремнію витягують єдиний кристал, поступово формуючи його у високоякісні інготи. Після охолодження та нарізки на тонкі пластини кремній піддається обробці для формування фотодіодів, що утворюють основу сонячного елемента. Кожен елемент оснащується контактами для відведення електричного струму та покривається антирефлексним шаром, який мінімізує втрати сонячного випромінювання через відбиття.

Монокристалічні панелі демонструють високий коефіцієнт корисної дії (ККД), що, за сучасними технологічними показниками, коливається у межах 20–23 %, а в умовах оптимального освітлення може досягати і 25 %[6]. Високий ККД пояснюється відсутністю внутрішніх дефектів кристалічної решітки, що мінімізує втрати енергії під час руху носіїв заряду. Завдяки цьому панелі ефективно працюють навіть при частково затемнених умовах або низькій інсоляції, що робить їх придатними для використання в регіонах із нестабільним сонячним випромінюванням.

Експлуатаційні характеристики монокристалічних панелей також відзначаються високою надійністю та тривалим терміном служби. Стандартний експлуатаційний період перевищує 25 років при мінімальному зниженні ефективності. Такі панелі здатні витримувати різкі коливання температур, опади, снігові та вітрові навантаження, що забезпечує їхню стабільну роботу в умовах різних кліматичних зон.

Монокристалічні панелі мають ряд переваг у порівнянні з іншими типами сонячних елементів. До основних переваг належать компактність та висока щільність потужності, що дозволяє отримувати більшу кількість електроенергії на одиницю площі, естетичний зовнішній вигляд та можливість інтеграції в архітектурні об'єкти. Крім того, монокристалічні панелі демонструють стабільність вироблення електроенергії протягом усього дня, незалежно від кута падіння сонячних променів, завдяки високій внутрішній провідності та однорідності матеріалу.

Разом з тим, використання монокристалічних панелей супроводжується певними обмеженнями. Виробництво високоякісного монокристалічного кремнію є досить дорогим і технологічно складним, що підвищує кінцеву вартість готових панелей. Також слід враховувати їхню чутливість до механічних впливів під час транспортування та монтажу, що вимагає дотримання спеціальних заходів безпеки та акуратності.

Монокристалічні сонячні панелі широко використовуються у різних сферах енергетики, починаючи від приватних житлових будинків та закінчуючи промисловими сонячними електростанціями. Вони є оптимальним рішенням у тих випадках, коли необхідно забезпечити максимальну ефективність вироблення електроенергії при обмеженій площі установки. Крім того, завдяки високій стабільності та довговічності, вони сприяють зниженню експлуатаційних витрат та забезпечують надійність енергопостачання на тривалий термін.

Таким чином, монокристалічні сонячні панелі залишаються одним із найбільш перспективних напрямів у розвитку відновлюваної енергетики. Їхні технічні характеристики, висока ефективність та надійність роблять їх ключовим компонентом сучасних фотогальванічних систем, які спрямовані на забезпечення сталого та екологічно безпечного виробництва електроенергії. Подальший розвиток технологій виробництва монокристалічного кремнію та вдосконалення конструкцій панелей дозволяють очікувати підвищення ефективності та зниження вартості таких систем у майбутньому, що відкриває нові перспективи для широкого використання сонячної енергії у світовому масштабі.

Сонячні панелі типу полікристал

Полікристалічні сонячні панелі належать до другого за поширеністю типу кремнієвих фотогальванічних елементів. На відміну від монокристалічних панелей, полікристалічні елементи виготовляються з багатокристалічного кремнію, що складається з численних кристалічних зерен різного розміру та орієнтації. Така структура значною мірою визначає електричні та експлуатаційні характеристики панелей, зокрема їх ефективність та виробничі витрати.

Процес виготовлення полікристалічного кремнію є менш енергоємним порівняно з технологією Чохральського, яка використовується для монокристалічних елементів. Виробництво здійснюється шляхом заливання розплавленого кремнію у спеціальні форми, де він поступово кристалізується, утворюючи багатокристалічний блок. Після охолодження блок нарізають на пластини необхідної товщини, які проходять обробку для створення фотодіодів. Кожна пластина оснащується металевими контактами та антирефлексним покриттям для мінімізації втрат сонячного світла.

Основною характеристикою полікристалічних панелей є їх відносно нижчий коефіцієнт корисної дії (ККД) порівняно з монокристалічними аналогами. Середній ККД сучасних полікристалічних панелей становить приблизно 15–18 %, що пояснюється наявністю меж зерен у кристалічній решітці, які створюють додатковий опір і спричиняють часткові втрати енергії під час руху електронів. Незважаючи на це, полікристалічні елементи залишаються ефективним рішенням для виробництва електроенергії в умовах достатнього освітлення та стабільної інсоляції.

До переваг полікристалічних панелей слід віднести нижчу вартість виробництва у порівнянні з монокристалічними панелями, що робить їх доступними для широкого кола споживачів. Крім того, вони демонструють добру термостійкість та здатність витримувати механічні навантаження, опади та різкі температурні коливання. Конструктивна надійність полікристалічних панелей забезпечує тривалий термін служби – зазвичай понад 20 років – при мінімальному зниженні ефективності протягом експлуатаційного періоду.

Полікристалічні панелі широко застосовуються як у приватному, так і в промисловому секторі енергетики. Вони є оптимальним рішенням для масштабних сонячних електростанцій, де ключовим фактором є баланс між вартістю установки та виробленою потужністю. Завдяки можливості економічного масштабування, полікристалічні панелі дозволяють створювати ефективні сонячні системи без значного перевищення бюджету проекту.

Однією з особливостей полікристалічних елементів є їх чутливість до часткових затемнень. На відміну від монокристалічних панелей, наявність меж зерен у полікристалічному кремнії спричиняє локальні втрати електричного струму, що може призводити до зниження загальної потужності модулю при частковому затіненні. Для мінімізації цих ефектів сучасні полікристалічні панелі оснащуються оптимізованою конфігурацією комірок та системами байпасних діодів, які дозволяють зберігати стабільність вироблення енергії навіть у складних умовах освітлення.

Ще однією перевагою полікристалічних панелей є їх естетичний вигляд. Хоча поверхня таких панелей має характерний блакитний відтінок з неоднорідною текстурою, вона добре інтегрується в архітектурне середовище і не порушує загальної естетики будівель. Крім того, порівняно менша енергоємність виробництва та використання більш дешевих матеріалів роблять полікристалічні панелі більш екологічно прийнятними з точки зору викидів парникових газів на етапі виробництва.

Отже, полікристалічні сонячні панелі являють собою ефективне та економічно доцільне рішення у сфері відновлюваної енергетики. Їхнє використання дозволяє забезпечувати стабільне вироблення електроенергії, досягати оптимального співвідношення «вартість–ефективність» та сприяти розвитку екологічно чистих джерел енергії. У майбутньому вдосконалення технологій багатокристалічного кремнію та конструкцій фотомодулів очікувано підвищить їхню ефективність та довговічність, що розширить можливості широкомасштабного застосування полікристалічних панелей у різних галузях енергетики.

На рисунку 1.3 наведено порівняння між моно- та полікристалічними фотомодулями.



Рисунок 1.3 – Зовнішня різниця між моно- та полікристалічними сонячними панелями [5]

Додатковий пасивний шар, технологія PERC

Технологія PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) є модернізованим варіантом традиційних монокристалічних сонячних модулів, у яких застосовано вдосконалену архітектуру фотоелементів. Основним конструктивним удосконаленням є нанесення пасиваційного шару на задню поверхню комірки. Такий шар зменшує рекомбінацію носіїв заряду та підвищує здатність елемента до повторного поглинання світлового потоку, що проходить крізь кремнієву пластину.

Пасиваційний шар також виконує важливу оптичну функцію — він відбиває довгохвильове сонячне випромінювання назад у кремнієвий шар, збільшуючи його корисне поглинання. Світлові хвилі високої частоти, які не здатні поглинатися кремнієвими структурами, у традиційних модулях проходять крізь елемент та нагрівають металевий шар з тильного боку, що знижує ефективність перетворення. У технології PERC цей ефект мінімізується, оскільки

пасиваційний шар повертає непродуктивні хвилі, запобігаючи нагріванню тильної поверхні елемента.

Завдяки такій конструкції панелі PERC демонструють підвищення ефективності на 2–3% порівняно зі звичайними монокристалічними модулями. Вони характеризуються кращою продуктивністю при підвищених температурах, а також у періоди низької освітленості — під час ранкових і вечірніх годин, що особливо важливо для домогосподарств.

Основні особливості сонячних панелей типу Passive Emitter and Rear Cell (PERC):

- підвищена ефективність завдяки поліпшеному поглинанню сонячного випромінювання;

- наявність пасиваційного шару на тильній поверхні, який відбиває не поглинуте світло та повертає його для повторного проходження через кремнієвий шар;

- дещо вища вартість виробництва, обумовлена додатковими технологічними операціями, проте нижча середня собівартість виробленої електроенергії за рахунок вищих показників продуктивності;

- покращена генерація за умов високих температур та недостатнього рівня сонячної інсоляції.

На рис. 1.4 представлено порівняння принципів роботи традиційного монокристалічного модуля та фотоелемента, виготовленого за технологією PERC.



Рисунок 1.4 – Різниця між принципом роботи монокристалічного та PERC фотомодуля [6]

Альтернативні фотоелектричні матеріали для сонячних панелей

Тонкоплівкові сонячні панелі представляють собою один із сучасних типів фотогальванічних елементів, які відрізняються конструктивною особливістю — використанням надзвичайно тонкого шару напівпровідникового матеріалу замість традиційних кристалічних кремнієвих пластин. Зазвичай товщина активного шару тонкоплівкових панелей складає від 1 до 5 мікрометрів, що суттєво менше за товщину кремнієвих пластин у монокристалічних або полікристалічних модулях. До основних матеріалів тонкоплівкових панелей відносять аморфний кремній (a-Si), кадмій-телурид (CdTe) та мідь-індій-галлій-селенід (CIGS).

Виробництво тонкоплівкових панелей відрізняється від традиційного кристалічного підходу значно меншою енергозатратністю. Основним технологічним процесом є нанесення активного напівпровідникового шару на підкладку, що може бути виконана із скла, металу або полімерних матеріалів, за допомогою методів осадження, випарювання або напилення. Після нанесення активного шару формується контактна сітка та захисний покрив, що забезпечує захист елемента від механічних і атмосферних впливів. Завдяки цій технології тонкоплівкові панелі можуть виготовлятися у великому форматі та різних геометричних конфігураціях, що значно розширює можливості їх інтеграції у будівельні конструкції, мобільні установки та архітектурні елементи.

Основною перевагою тонкоплівкових панелей є їх здатність ефективно

працювати при розсіяному та низькому освітленні, включаючи похмурі дні або розташування з частковим затемненням. Така властивість пояснюється широким спектральним поглинанням напівпровідникових матеріалів, які використовуються у тонкоплівкових елементах. Водночас середній коефіцієнт корисної дії (ККД) тонкоплівкових панелей за сучасними технологіями становить 10–13 % для аморфного кремнію, 12–14 % для CdTe та 15–18 % для CIGS, що є нижчим порівняно з монокристалічними та полікристалічними аналогами. Проте зниження ККД компенсується економічністю виробництва, гнучкістю конструкції та можливістю масштабування.

Тонкоплівкові панелі характеризуються відносно невеликою масою та еластичністю, що дозволяє їх використовувати в конструкціях зі складною геометрією та на покриттях, які не витримують великого навантаження. Вони особливо доцільні для інтеграції у будівлі як елементи «сонячного фасаду», гнучкі модулі для покрівель та транспортних засобів, а також мобільні системи для автономного енергопостачання. Крім того, технологія тонкоплівкових елементів дозволяє застосовувати модулі на різних типах підкладок, що сприяє зниженню собівартості готової продукції та зменшенню витрат енергії на виробництво у порівнянні з кристалічними панелями.

Серед недоліків тонкоплівкових панелей слід відзначити їх нижчий ККД у порівнянні з кристалічними аналогами, а також поступове зниження ефективності з часом, що зумовлено структурними особливостями тонкого шару напівпровідника. Однак завдяки сучасним методам оптимізації складу матеріалів, контролю якості нанесення та впровадженню захисних покриттів, термін служби тонкоплівкових панелей досягає 15–20 років із прийнятним рівнем деградації.

Застосування тонкоплівкових панелей має значний потенціал у масштабах великої та малої енергетики. У великих сонячних електростанціях вони дозволяють зменшити витрати на конструктивні елементи та спрощують процес монтажу великих площ модулів. У малих автономних системах та портативних установках тонкоплівкові панелі забезпечують мобільність, легкість та

адаптивність до складних умов експлуатації. Завдяки своїм властивостям, вони сприяють розвитку гнучких та інтегрованих рішень у сфері відновлюваної енергетики, що набуває особливої актуальності у контексті енергетичної безпеки та екологічної сталості.

Таким чином, тонкоплівкові сонячні панелі є перспективним напрямом розвитку фотогальванічних технологій, що дозволяє поєднувати економічність виробництва, гнучкість конструкцій та можливість використання у різних умовах освітлення. Подальший розвиток технологій напівпровідникових матеріалів та вдосконалення процесів виготовлення тонкоплівкових модулів очікувано підвищить їхню ефективність та довговічність, що відкрис нові можливості для широкого впровадження цих систем у житловому, промисловому та транспортному секторах.

На рис. 1.5 наведено зразок тонкоплівкового фотомодуля.



Рисунок 1.5 – Тонкоплівковий фотомодуль [5]

Існують також менш поширені, але технологічно прогресивні категорії сонячних панелей, які відрізняються специфічними характеристиками та унікальними функціями:

Новітні фотоелектричні технології:

Bifacial модулі – здатні захоплювати сонячне випромінювання з обох сторін, що забезпечує підвищену вихідну потужність і ефективність у певних схемах монтажу.

Концентровані фотоелектричні модулі (CPV) – застосовують оптичні системи, такі як лінзи або дзеркала, для фокусування сонячного світла на невеликих високопродуктивних елементах; характеризуються високим коефіцієнтом концентрації та оптимальні для регіонів із інтенсивним прямим сонячним випромінюванням.

Органічні фотомодулі – виготовляються з органічних напівпровідникових матеріалів; відзначаються малою вагою, гнучкістю, проте мають нижчу ефективність порівняно з неорганічними технологіями.

Сенсибілізовані барвниками елементи (DSSC) – містять пористі шари діоксиду титану, покриті фотосенсибілізуючим барвником; характеризуються унікальною конструкцією і покращеною продуктивністю при низькому рівні освітлення.

Перовскітні елементи – базуються на перовскітних структурованих матеріалах; швидко розвиваюча технологія з високим потенціалом ефективності.

Тандемні або багат шарові сонячні елементи – складаються з кількох шарів напівпровідника з різною шириною забороненої зони, що дозволяє підвищити ефективність; зазвичай застосовуються у спеціалізованих системах.

Гібридні та спеціалізовані фотомодулі:

Гібридні модулі – поєднують різні фотоелектричні технології, використовуючи переваги кожної з них, що дозволяє кастомізувати рішення під конкретні умови експлуатації.

Інтегровані в будівлю (BIPV) – замінюють стандартні будівельні матеріали, інтегруючись у конструкції будівель, поєднуючи естетику та функціональність.

Плавучі модулі – призначені для розміщення на водних об'єктах; плавучі конструкції дозволяють підвищувати ефективність завдяки природному охолодженню.

Прозорі фотомодулі – пропускають світло під час генерації електроенергії;

застосовуються в архітектурних і будівельних інтеграціях, проте мають нижчу ефективність порівняно з непрозорими аналогами.

Гнучкі модулі – виготовляються на гнучких підкладках, що дозволяє монтувати їх на криволінійних поверхнях або у легких мобільних конструкціях.

Циліндричні модулі – використовують елементи циліндричної форми, що забезпечує захоплення сонячного світла під різними кутами; володіють унікальним дизайном.

Фотомодулі зі зворотним контактом – контакти розташовані на тильній стороні, що забезпечує чистоту лицьової поверхні та покращену естетику.

Розумні сонячні панелі – обладнані вбудованою електронікою для моніторингу та підключення, що дозволяє віддалено керувати системою та збирати детальні дані про її роботу [7].

1.2 Теплові сонячні установки

Сонячний тепловий колектор є ключовим компонентом сонячної теплової системи, призначеним для збору сонячного випромінювання та його перетворення на теплову енергію.

Зазвичай такі колектори встановлюють на даху з орієнтацією до сонця. Через постійний вплив змінних погодних умов ці пристрої повинні мати високу механічну міцність, щоб витримувати природні навантаження та забезпечувати довготривалу роботу.

На ринку представлені різні конструкції сонячних колекторів, однак найпростіший тип включає чорний поглинальний матеріал, навколо якого проходять труби з циркулюючою водою. Поглинальний шар нагрівається під дією сонячного світла, передаючи тепло теплоносію. Хоча це базова конструкція, існують і більш складні варіанти, що підвищують ефективність збору енергії.

Сучасні сонячні колектори зазвичай складаються з поглинальної пластини, яка концентрує та утримує сонячне випромінювання. Отримана теплова енергія може використовуватися для різних потреб: опалення приміщень, підігріву води у басейнах, гарячого водопостачання або навіть виробництва електроенергії на

великих теплових станціях [8].

Геліосистеми класифікують за різними критеріями [9]:

За призначенням:

- підігрів води в басейнах;
- опалення будівель;
- гаряче водопостачання;
- генерація електроенергії на великих сонячних теплових електростанціях.

За періодом експлуатації:

- сезонні;
- цілорічні.

За охопленням споживачів:

- індивідуальні;
- автономні (пооб'єктні);
- централізовані.

За часом акумулювання енергії:

- без акумулювання;
- з короткостроковим (доба, кілька діб) акумулюванням;
- з довгостроковим (місячним, сезонним) акумулюванням.

За характером руху теплоносія:

- без циркуляції (акумуляційні);
- з природною циркуляцією;
- з примусовою циркуляцією.

За кількістю контурів:

- одно-, дво- або багатоконтурні.

За режимом відбору теплоти:

- з постійним або періодичним відбором;
- з постійною температурою та змінною витратою теплоносія;
- із змінною температурою та постійною витратою.

За наявністю резервного джерела енергії:

- з дублером;
- без дублера.

За типом теплоносія:

- повітря;
- вода;
- антифриз.

Після аналізу основних параметрів класифікації можна перейти до детального розгляду основних типів сонячних колекторів, їх конструктивних особливостей та принципів роботи.

Сонячні колектори відкритого типу

Цей тип сонячних колекторів вважається найпростішим та найпримітивнішим. Він представляє собою пластиковий резервуар, наповнений водою, з верхньою поверхнею з пластику або гуми, яка ефективно поглинає сонячне випромінювання. Зазвичай такі відкриті колектори застосовують у літній період на приватних дачах або в заміських будинках для підігріву води в басейнах чи вуличних душах. Поверхня цих колекторів не захищена склом. Незважаючи на низьку вартість і просту конструкцію, вони характеризуються невисоким коефіцієнтом корисної дії та обмеженим терміном служби — приблизно від 1 до 3 років. Продуктивність цих колекторів значною мірою залежить від погодних умов та температури навколишнього середовища, тому їх доцільно використовувати переважно в південних регіонах країни [10]. На рис. 1.6 показано зовнішній вигляд відкритих сонячних колекторів.



Рисунок 1.6 – Відкриті сонячні колектори [10]

Сонячні колектори повітряного типу

Повітряні сонячні колектори призначені для обігріву та вентиляції приміщень, роботи сушильних установок, систем рекуперації повітря та інших подібних застосувань. Ці пристрої зустрічаються рідше, ніж плоскі або вакуумні колектори, а роль теплоносія в них виконує не рідина, а повітря.

Конструктивно повітряний колектор складається з ребристої або іноді перфорованої металевій пластини з селективним чорним покриттям, або з системи металевих трубок з високою теплопровідністю. Принцип роботи базується на подачі нагрітого сонячним випромінюванням повітря в приміщення природним шляхом або за допомогою примусової вентиляції. Колектор підключається до будівлі через повітропроводи, в яких встановлюють вентилятори для забезпечення циркуляції та конвекції повітря. Нагрівання повітря здійснюється через безпосередній контакт з теплопровідним металом, що накопичує сонячну енергію.

Повітряні колектори відзначаються простотою та надійністю конструкції, а їхній термін служби може сягати 10–20 років. До недоліків слід віднести потребу у додатковій електроенергії для роботи вентиляторів, що підвищує витрати на експлуатацію [10]. На рис. 1.7 наведено зовнішній вигляд повітряного сонячного

колектора.



Рисунок 1.7 – Повітряний сонячний колектор [10]

Сонячні колектори типу плоских пластинчастих

Плоский пластинчастий сонячний колектор характеризується шаруватою конструкцією. Його основою є пластина з матеріалу з високою теплоємністю, наприклад, міді або алюмінію, які відзначаються високою теплопровідністю. Зверху така пластина може мати чорне селективне покриття, наприклад оксид міді, що сприяє максимальному поглинанню сонячного випромінювання з мінімальним відбиттям — цей елемент називають абсорбером [10].

Селективне покриття має такі особливості: воно ефективно поглинає сонячне світло, майже не віддає тепло, забезпечує оптимальну теплопередачу, але при цьому є дорогим і крихким; при збільшенні його товщини знижується теплопровідність, тому потрібна підкладка, а товщина шару зазвичай не перевищує 3 мкм.

До абсорберної пластини знизу приварені тонкі трубки, розташовані паралельно або у вигляді зміювика, через які циркулює теплоносій. Сонячна

енергія, поглинена абсорбером, нагріває теплоносій, який потім передає тепло системі [10].

За конструкцією плоскі колектори можуть бути: ліровидними, меандровими або з подвійною лірою. Їх основні компоненти включають скління, корпус, абсорбер, селективне покриття, теплоізоляцію та трубки з теплоносієм. Абсорбер розташовується всередині теплоізоляційного корпусу з алюмінієвого профілю і накривається зверху захисним склом (звичайним або загартованим), яке забезпечує мінімальне світлопропускання та створює ефект "парника". Для зменшення тепловтрат між корпусом і абсорбером обов'язково укладається теплоізоляційний шар під пластину абсорбера [10].

Теплоізоляція повинна мати такі характеристики: високі теплотехнічні властивості, низьку тепловіддачу, відсутність поглинальних властивостей та повну герметизацію. Дно та боки колектора також покриваються ізоляційним матеріалом для мінімізації втрат тепла.

Сонячне випромінювання проходить через скління і досягає поглинальної пластини, яка нагрівається і передає тепло теплоносію, що циркулює всередині колектора. На рис. 1.8 показано зовнішній вигляд плоского сонячного колектора.



Рисунок 1.8 – Плоский сонячний колектор [10]

Переваги плоских сонячних колекторів:

- відносно простий і швидкий монтаж;
- нижча вартість у порівнянні з вакуумними колекторами;
- коефіцієнт корисної дії (ККД) до 65%;
- можливість експлуатації протягом всього року;
- надійна конструкція;
- ефективна робота при температурі від 20 до 40°C вище за температуру навколишнього середовища;
- тривалий термін служби — від 10 до 50 років.
- Недоліки плоских колекторів:
 - корпус не є повністю герметичним;
 - скляна поверхня чутлива до різких перепадів температур, хоча можна використовувати антирефлексне, загартоване або самоочисне скло з покриттям діоксидом титану;
 - значний конвективний теплообмін із навколишнім середовищем;
 - у разі пошкодження необхідно проводити повний демонтаж колектора;
 - періодичне очищення поверхні обов'язкове;
 - рідину слід міняти або зливати на зиму, щоб запобігти замерзанню;
 - максимальна ефективність досягається лише при прямому сонячному світлі;
 - продуктивність значно знижується в зимовий період.
 - скляна поверхня дуже чутлива до різких коливань температури; можна використовувати антирефлексне, загартоване або самоочисне скло з покриттям діоксидом титану;
 - значні тепловтрати через високий конвективний теплообмін;
 - у випадку пошкодження необхідно здійснювати повний демонтаж колектора;
 - поверхню потрібно регулярно очищати;
 - теплоносій слід замінювати або зливати на зимовий період, щоб запобігти замерзанню;

- максимальна ефективність досягається лише при прямому попаданні сонячних променів;
- продуктивність суттєво знижується взимку.

Сонячні колектори типу вакуумні трубчасті

Трубчасті вакуумні сонячні колектори є одними з найефективніших і водночас простих у монтажі пристроїв серед усіх типів сонячних колекторів. В усіх моделях цього типу, незалежно від виробника або конструктивних особливостей, використовується вакуум та принцип дзеркального відбиття, що дозволяє значно підвищити продуктивність.

Головна відмінність трубчастих колекторів від плоских полягає в конструкції абсорбера. Замість традиційної металеві пластины тут застосовується вакуумована скляна трубка з металевим стрижнем всередині, який містить теплоносій та покритий селективним шаром для ефективного поглинання сонячної енергії. Трубчасті колектори комплектуються каркасом і можуть монтуватися по секціях, що спрощує їх установку.

Конструкція передбачає гідравлічну мережу, де трубки приєднані до теплообмінника через теплові канали, розташовані всередині абсорбера. При цьому корпус та трубки можуть мати різну форму та принцип дії.

Класифікація трубчастих колекторів:

- За типом трубки:

Коаксіальні – конструкція нагадує термос (трубка в трубці), внутрішня трубка має селективне покриття; тепловий канал розташований усередині, подвійне скління, вакуум відсутній у внутрішній трубці;

Пір'яні – одна трубка з абсорбером у вигляді «пір'я птаха», тепловий канал під абсорбером, подвійне скління, вакуум знаходиться в просторі теплового каналу, ефективніші завдяки оптимальній тепловіддачі.

- За типом теплового каналу:

Трубка «Heat pipe»;

Прямоточні (U-подібні, трубка в трубці).

«Heat pipe» коаксіальні

В якості робочої рідини використовують низькокиплячі речовини з температурою випаровування до 35°C. Нагріта трубка випаровує рідину, пара піднімається до теплоносія, віддає тепло, охолоджується, конденсується та стікає вниз. Поверхня головки може бути покрита міддю або нікелем для підвищення механічної міцності та стійкості до корозії. Через проміжок між внутрішньою трубкою та теплоносієм частина теплоти не передається, що знижує ККД до 65%. Такі колектори залишаються ефективними навіть при морозах до -30...-35°C.

U-подібна коаксіальна

Завдяки близькому розташуванню трубки до поверхні внутрішньої трубки, зменшуються тепловтрати та кількість етапів теплопередачі, що підвищує ККД до 70-75%. Теплоносій нагрівається відразу, проточна конструкція забезпечує швидку передачу тепла. При пошкодженні заміні підлягає весь колектор, а не окремі трубки.

«Heat pipe» пір'яна

Пір'яні трубки мають міцну товсту стінку та містять мідну теплопоглинальну трубку з гофрованою пластиною та селективним шаром. Вакуум утворюється безпосередньо в тепловому каналі, який частково інтегрований з абсорбером. Тепло передається одразу теплоносію, що забезпечує ККД до 77%. Цей тип дорожчий, складніший у виробництві та ремонті – при пошкодженні одного елемента доводиться замінювати всю систему.

Прямоточна трубка

Вода рухається по внутрішній трубці холодною, зовнішня трубка нагріває теплоносій безпосередньо. Конструкція «трубка в трубці» забезпечує майже миттєву передачу тепла.

На рис. 1.9 показані різні види вакуумних трубок.

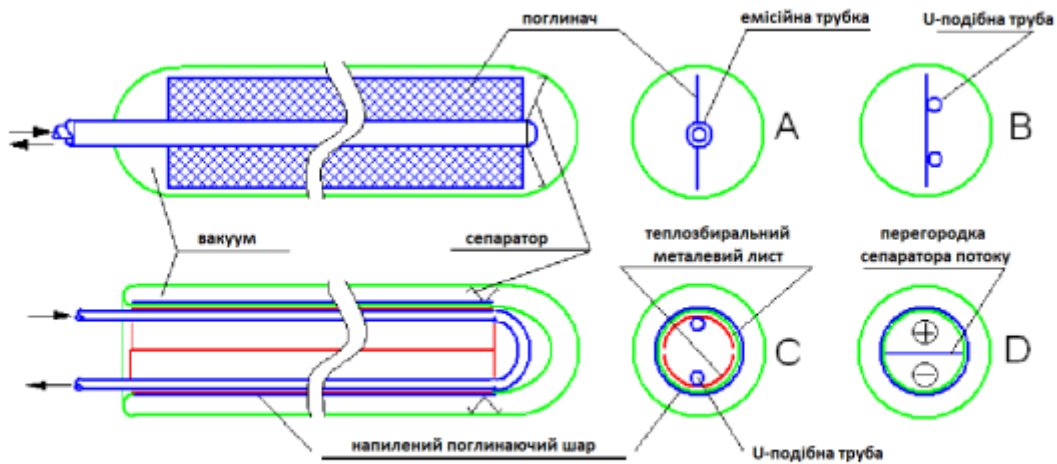


Рисунок 1.9 – Вигляд різних вакуумних трубок [11]

Переваги трубчастих вакуумних сонячних колекторів:

Досягають вищих температур теплоносія та забезпечують більший ККД протягом усього року;

Можливість експлуатації при від’ємних температурах;

Багато моделей оснащені ударостійким склом;

Простота монтажу та встановлення;

Легкість ремонту та заміни окремих елементів;

Краща парусність (менший вплив вітру на конструкцію);

Вища температура стагнації порівняно з плоскими колекторами.

Недоліки:

Можливість тріскання скляних трубок;

Більш складна конструкція, порівняно з плоскими колекторами;

Великі габарити та вища початкова вартість;

Взимку продуктивність може знижуватися через опади, іній або сніг;

Термін експлуатації трохи менший, ніж у плоских колекторів (приблизно 7–8 років);

Підтримка вакууму в системі може бути проблематичною, що впливає на ефективність.

Сонячні колектори лінійно-фокусні або ж параболічні

Лінійно-фокусні сонячні колектори, більш відомі як параболічні жолоби (Line Focus), працюють за принципом концентрування сонячного випромінювання на абсорбуючій трубі для нагрівання води або іншого теплоносія.

Основні характеристики:

- Абсорбер у вигляді центральної труби, розташованої вздовж параболоїдного відбивача;
- Параболічна форма жолоба забезпечує концентрування сонячного світла на трубі, що підвищує температуру теплоносія;
- Поворотні конструкції жолобів дозволяють слідкувати за рухом сонця протягом дня, що підвищує ефективність збору енергії;
- Використовуються здебільшого для виробництва пари та теплової енергії на великих сонячних теплових електростанціях, а не для побутових цілей;
- Забезпечують високі температури теплоносія та високу щільність теплової енергії завдяки фокусуванню сонячного випромінювання на вузькій площі.

Переваги: висока продуктивність, можливість концентрації сонячного світла; недоліки: великі розміри, складність монтажу та використання, орієнтовані на промислові об'єкти.

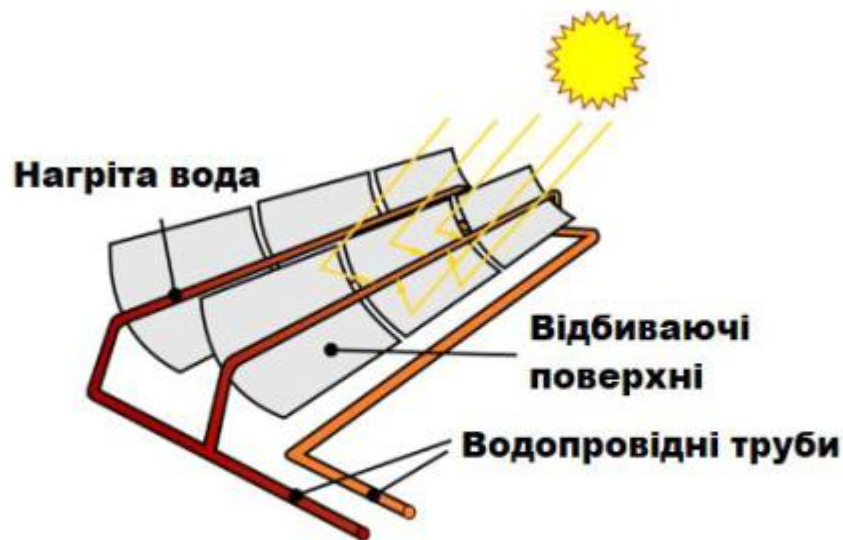


Рисунок 1.10 - Схема лінійного фокусування сонячного колектора [12]

Сонячні колектори точкового фокусування. Двигуни Стірлінга

Колектори з точковим фокусуванням, або параболічні тарілки, являють собою великі сонячні установки параболічної форми з високовідбивним покриттям.

Основні принципи роботи:

Уся сонячна енергія збирається і концентрується в одній точці на абсорбуючій пластині;

Нагріта точка забезпечує дуже високі температури, що дозволяє використовувати тепло для приводів двигунів Стірлінга або інших теплових машин;

Тарілки здатні працювати як автономні установки;

Для оптимальної ефективності вони постійно відстежують положення сонця за допомогою систем відстеження;

Можливе поєднання з концентрованими фотоелектричними модулями для одночасного виробництва електроенергії.

Переваги: високі температури теплоносія, можливість автономної роботи, інтеграція з CPV-системами; недоліки: великі розміри, складна конструкція, необхідність точного відстеження сонця.



Рисунок 1.11 - Колектор з точковим фокусуванням [12]

1.3 Засоби та методи енергозбереження

Акумуляторні батареї є невід'ємною складовою сучасних сонячних електростанцій, що забезпечують ефективне зберігання та управління електроенергією, виробленою фотогальванічними модулями. Основна функція акумуляторів полягає у накопиченні надлишкової електричної енергії, виробленої в періоди пікового сонячного випромінювання, та подальшому її використанні в періоди недостатнього або відсутнього сонячного освітлення, що забезпечує безперервне електропостачання.

Значення акумуляторних батарей особливо велике для автономних сонячних систем, які не підключені до централізованої енергомережі. У таких системах вони виконують роль буферу між виробленням енергії та її споживанням, дозволяючи ефективно використовувати електроенергію незалежно від часу доби та погодних умов. Це особливо актуально у віддалених регіонах, де підключення до централізованих електромереж економічно або технічно недоцільне.

Крім автономних систем, акумулятори важливі й для гібридних станцій, які поєднують сонячну генерацію з іншими джерелами енергії, наприклад,

вітровими або дизельними генераторами. У таких комплексах акумуляторні батареї дозволяють оптимізувати вироблення та споживання електроенергії, згладжувати коливання навантаження та підвищувати стабільність енергопостачання.

Сучасні акумуляторні системи для сонячних електростанцій представлені різними технологіями, серед яких найбільш поширеними є свинцево-кислотні, літій-іонні та нікель-металгідридні батареї. Свинцево-кислотні акумулятори характеризуються відносно низькою вартістю та простотою конструкції, проте мають обмежену циклічність та низьку щільність енергії. Літій-іонні батареї вирізняються високим ККД, великою кількістю циклів заряд-розряд, компактністю та довгим терміном служби, що робить їх найбільш перспективними для сучасних сонячних електростанцій. Нікель-металгідридні акумулятори, хоча й менш поширені, використовуються у спеціалізованих застосуваннях завдяки хорошій температурній стабільності та відносно високій безпеці.

Важливим показником для акумуляторних батарей є їхня ємність та тривалість циклів заряд-розряд. Ємність визначає обсяг енергії, який можна зберегти для подальшого використання, тоді як кількість циклів характеризує ресурс батареї протягом її експлуатації. Для ефективної роботи сонячної електростанції важливо правильно підбирати акумулятори з урахуванням потреб системи, умов експлуатації та передбачуваного навантаження.

Значення акумуляторів для сонячних електростанцій не обмежується лише накопиченням енергії. Вони також виконують функцію стабілізатора напруги та струму, захищаючи обладнання станції та споживачів від короткочасних піків або падінь напруги. Крім того, інтеграція акумуляторів у систему керування дозволяє оптимізувати використання відновлюваних джерел енергії, зменшуючи залежність від зовнішніх енергомереж та підвищуючи економічну ефективність інвестицій у сонячну генерацію.

Особливу роль акумуляторні батареї відіграють у контексті зростаючої популярності «розумних мереж» (smart grid) та інтегрованих енергетичних

систем. У таких мережах акумулятори використовуються для балансування навантаження, накопичення надлишкової енергії в пікові години вироблення та подальшого постачання у періоди пікового споживання, що сприяє зменшенню втрат у мережі та підвищенню надійності енергопостачання.

Таким чином, акумуляторні батареї є критично важливим елементом сонячних електростанцій, що забезпечує ефективне та надійне використання відновлюваної енергії. Їхнє значення проявляється у можливості автономного енергопостачання, стабілізації електричних параметрів, підвищенні економічної ефективності та інтеграції у сучасні енергетичні системи. Розвиток технологій акумуляторів, зокрема впровадження літій-іонних та інших високоефективних хімічних систем, відкриває нові перспективи для збільшення масштабів застосування сонячної енергетики та забезпечення стабільності та сталості енергопостачання у глобальному контексті.

Акумуляторні батареї свинцево-кислотного типу

Свинцево-кислотні батареї (СКБ) є одним із найстаріших і водночас найбільш поширених типів акумуляторних систем для зберігання електричної енергії. Вони були вперше розроблені наприкінці XIX століття та з того часу зазнали численних удосконалень, що дозволило підвищити їхню надійність та експлуатаційні характеристики. Основною конструктивною складовою СКБ є електроди з свинцю або свинцевого сплаву, занурені у розчин сірчаної кислоти, який виконує функцію електроліту.

Принцип роботи свинцево-кислотної батареї базується на оборотних хімічних реакціях між свинцевими електродами та електролітом під час процесів заряджання та розряджання. Під час розряджання електрохімічна енергія перетворюється на електричну, що забезпечує живлення споживачів або накопичення надлишкової енергії сонячних панелей. При заряджанні відбувається відновлення вихідних матеріалів електродів та електроліту, що дозволяє багаторазово використовувати батарею протягом її ресурсу.

Свинцево-кислотні батареї використовуються у сонячних електростанціях

як елемент накопичення енергії для автономних та гібридних систем. Вони забезпечують безперервне електропостачання в періоди недостатнього або відсутнього сонячного освітлення, стабілізують напругу та струм у мережі, а також сприяють оптимальному використанню електроенергії, виробленої сонячними панелями. Завдяки відносно низькій вартості та простоті експлуатації СКБ залишаються одним із найбільш економічно доступних рішень для невеликих і середніх сонячних систем.

Серед основних переваг свинцево-кислотних батарей варто виділити:

Низька вартість виробництва та обслуговування – СКБ є більш доступними у порівнянні з літій-іонними або іншими сучасними технологіями акумуляторів, що робить їх привабливими для малих та середніх сонячних електростанцій.

Простота конструкції та надійність – Технологія свинцево-кислотних батарей добре відпрацьована, а конструктивні рішення дозволяють експлуатувати їх у різних кліматичних умовах при дотриманні основних правил безпеки.

Висока здатність до короткочасних пікових навантажень – СКБ можуть витримувати раптові споживчі піки електричного струму, що важливо для стабільного живлення електрообладнання.

Широке поширення та доступність компонентів – Завдяки великій кількості виробників та налагодженій логістиці, запасні частини, електроліт та обслуговуючі матеріали легко доступні.

Разом із цим, свинцево-кислотні батареї мають низку суттєвих недоліків, які слід враховувати при використанні у сонячних електростанціях:

Обмежена циклічність та ресурс – Стандартні СКБ забезпечують 500–1000 циклів заряд-розряд, після чого ефективність батареї значно знижується, що потребує її заміни.

Низька енергетична щільність – Свинцево-кислотні батареї займають значну площу та мають велику масу при порівняно невеликому об'ємі зберігання енергії, що ускладнює їх використання в мобільних або обмежених просторових умовах.

Чутливість до глибокого розряду та температурних коливань – Часті або глибокі розряди можуть суттєво скоротити термін служби СКБ. Крім того, ефективність батарей значно знижується при низьких температурах, а при високих температурах прискорюються хімічні процеси, що призводить до деградації електроліту та пластин.

Необхідність технічного обслуговування – Рідинні свинцево-кислотні батареї потребують контролю рівня електроліту та періодичного доливання дистильованої води. Невиконання цих вимог може спричинити передчасний вихід батареї з ладу.

Екологічні обмеження – Свинець та сірчана кислота є токсичними матеріалами, що ускладнює утилізацію відпрацьованих батарей і вимагає дотримання заходів безпеки під час експлуатації та зберігання.

Таким чином, свинцево-кислотні батареї, незважаючи на свої обмеження, залишаються важливим елементом сонячних електростанцій завдяки економічній доступності, простоті конструкції та надійності. Вони особливо доцільні для невеликих автономних систем та систем із обмеженим бюджетом, де потреба у високій щільності енергії та великій кількості циклів не є критичною. Водночас, при проектуванні сонячної електростанції необхідно враховувати специфічні вимоги до обслуговування, температурного режиму та глибини розряду, щоб забезпечити оптимальну ефективність та тривалий термін служби батарей.

У сучасних умовах розвитку відновлюваної енергетики, вдосконалення свинцево-кислотних батарей, включаючи глибокі циклічні моделі (deep-cycle) та герметизовані версії (VRLA), дозволяє підвищити їхню ефективність і довговічність, розширюючи область застосування у сонячних системах та сприяючи більш широкому впровадженню відновлюваних джерел енергії.

Акумуляторні батареї літій-іонного (Li-Ion) типу

Літій-іонні батареї (Li-ion) є сучасним та одним із найбільш перспективних типів акумуляторних систем для накопичення електричної енергії у сонячних електростанціях. Вони використовують літій як ключовий елемент електродів і

характеризуються високою щільністю енергії, ефективністю та тривалим терміном служби порівняно з традиційними свинцево-кислотними батареями. Основною конструктивною особливістю Li-ion батарей є використання позитивного електрода з літій-метал оксиду та негативного електрода з графіту, занурених у органічний електроліт, який забезпечує обмін іонами літію між електродами під час процесів заряджання та розряджання.

Принцип роботи літій-іонної батареї базується на зворотному переміщенні літійових іонів між анодом і катодом через електроліт та сепаратор, який запобігає короткому замиканню. Під час розряджання літій іони переміщуються від анода до катода, генеруючи електричний струм, що забезпечує живлення споживачів або накопичення надлишкової енергії сонячних панелей. Під час заряджання процес відбувається у зворотному напрямі, відновлюючи початковий стан електродів.

Літій-іонні батареї широко застосовуються у автономних та гібридних сонячних електростанціях завдяки низці ключових переваг. По-перше, вони характеризуються високою енергетичною щільністю, що дозволяє значно зменшити масу та габарити акумуляторної системи при збереженні необхідного обсягу накопичуваної енергії. По-друге, літій-іонні батареї забезпечують високий ККД (до 95%), що сприяє більш ефективному використанню виробленої сонячними панелями енергії. По-третє, вони підтримують велику кількість циклів заряд-розряд (2000–5000 циклів залежно від типу та умов експлуатації), що значно перевищує ресурс свинцево-кислотних аналогів.

Іншою важливою перевагою літій-іонних батарей є відсутність необхідності регулярного технічного обслуговування, характерного для свинцево-кислотних батарей, таких як доливання електроліту або контроль рівня рідини. Вони також менш чутливі до часткових розрядів, що дозволяє використовувати акумулятори більш гнучко та безпечніше для довготривалої експлуатації. Літій-іонні батареї демонструють високу стабільність у широкому діапазоні температур та можуть працювати у системах з інтегрованими контролерами заряду, що оптимізують процес накопичення та витрати енергії.

Водночас літій-іонні батареї мають певні обмеження та недоліки, які необхідно враховувати при їх впровадженні у сонячні електростанції. Найсуттєвішими з них є:

Висока початкова вартість – вартість Li-ion батарей значно перевищує аналогічні свинцево-кислотні рішення, що може обмежувати їх застосування у малобюджетних системах.

Необхідність контролю температури та системи управління – для забезпечення безпечної експлуатації та запобігання перегріву або термічному розгону батарей необхідне використання систем моніторингу та охолодження.

Складність утилізації та екологічні аспекти – хоча Li-ion батареї містять менше токсичних речовин, ніж свинцево-кислотні аналоги, утилізація відпрацьованих елементів потребує спеціалізованих процедур та відповідного обладнання.

Потенційна небезпека при механічних пошкодженнях – пошкодження батарей може призвести до короткого замикання та термічного розгону, що потребує дотримання правил безпеки під час монтажу та експлуатації.

Таким чином, літій-іонні батареї є високоефективним та перспективним рішенням для накопичення електроенергії у сонячних електростанціях. Їхні переваги — висока щільність енергії, великий ресурс циклів, мінімальні потреби в обслуговуванні та високий ККД — роблять їх особливо доцільними для автономних систем, гібридних станцій та інтегрованих енергетичних мереж. Водночас високі капітальні витрати та вимоги до систем контролю підкреслюють необхідність уважного планування та оптимізації експлуатаційних режимів.

Сучасні тенденції розвитку літій-іонних технологій, включаючи використання нових хімічних складів електродів (LFP, NMC, NCA), вдосконалення електролітів та інтеграцію з системами управління енергією, забезпечують підвищення безпеки, стабільності та довговічності батарей. Це робить Li-ion системи ключовим елементом сучасних та перспективних сонячних електростанцій, сприяючи широкому впровадженню відновлюваної енергетики та забезпеченню стабільного та ефективного електропостачання.

Акумуляторні батареї нікель-кадмієвого (Ni-Cd) типу

Нікель-кадмієві (Ni-Cd) батареї є одним із класичних типів акумуляторних систем, що використовуються для зберігання електричної енергії. Основними конструктивними елементами Ni-Cd батарей є анод з кадмію, катод з нікелю (гідроксид нікелю) та електроліт на основі розчину калієвої або натрієвої гідроксидної сполуки. Принцип роботи батарей базується на оборотних хімічних реакціях між електродами та електролітом під час процесів заряджання та розряджання.

Під час розряджання кадмієвий анод окислюється до оксиду кадмію, а нікелевий катод відновлюється, що дозволяє батареї видавати електричний струм. Процес заряджання відбувається у зворотному напрямку, відновлюючи вихідний стан електродів та забезпечуючи готовність батареї до наступного циклу розряджання.

Нікель-кадмієві батареї застосовуються у сонячних електростанціях переважно в автономних та спеціалізованих системах, де висувуються вимоги до надійності та стабільної роботи при низьких температурах. Ni-Cd батареї здатні витримувати глибокі розряди та значну кількість циклів заряд-розряд, що робить їх особливо цінними у регіонах із нестабільною інсоляцією або для систем з нерегулярним використанням електроенергії.

До основних переваг нікель-кадмієвих батарей належать:

Висока циклічність та тривалий термін служби – Ni-Cd батареї можуть витримувати кілька тисяч циклів заряд-розряд, що значно перевищує ресурс свинцево-кислотних батарей.

Стабільна робота при низьких та високих температурах – Ці батареї зберігають працездатність у широкому температурному діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, що робить їх придатними для експлуатації в суворих кліматичних умовах.

Глибокий розряд без суттєвого зниження ресурсу – Ni-Cd батареї можуть переносити глибокі цикли розряджання без значної деградації ємності, що

підвищує їх гнучкість у використанні.

Надійність та стійкість до механічних впливів – Конструкція батарей забезпечує підвищену міцність та стійкість до вібрацій і ударів, що важливо для автономних сонячних систем у складних умовах.

Водночас, нікель-кадмієві батареї мають ряд суттєвих недоліків, які обмежують їх широке використання у сучасних сонячних електростанціях:

Ефект пам'яті (memory effect) – При часткових циклах заряд-розряд батарея може «запам'ятовувати» попередній рівень заряду, що призводить до зменшення ефективної ємності при подальшій експлуатації.

Висока токсичність кадмію – Кадмій є важким токсичним металом, що створює серйозні проблеми при утилізації відпрацьованих батарей та вимагає суворого дотримання екологічних стандартів.

Відносно низька енергетична щільність – Порівняно з літій-іонними батареями, Ni-Cd мають меншу щільність енергії, що призводить до збільшення маси та об'єму акумуляторної системи.

Необхідність регулярного обслуговування – Для підтримання оптимальної роботи батарей необхідно періодично виконувати повні цикли заряд-розряд та контролювати стан електроліту у традиційних конструкціях.

Незважаючи на зазначені обмеження, Ni-Cd батареї знаходять застосування у спеціалізованих сонячних електростанціях, що працюють в екстремальних умовах або в системах, де пріоритетом є надійність і тривалість служби при високій циклічності. Вони можуть використовуватися у промислових автономних системах, телекомунікаційних об'єктах, освітлювальних системах та в аварійних джерелах живлення.

Сучасні тенденції розвитку Ni-Cd технологій зосереджені на покращенні екологічних характеристик, підвищенні енергетичної щільності та зниженні ефекту пам'яті. Використання герметизованих конструкцій (sealed Ni-Cd) та оптимізація хімічного складу електродів дозволяє підвищити безпеку і надійність батарей у довгостроковій експлуатації.

Таким чином, нікель-кадмієві батареї залишаються важливим типом

аккумуляторних систем для сонячних електростанцій у специфічних умовах експлуатації. Вони поєднують високу надійність, стійкість до глибоких розрядів та екстремальних температур з певними обмеженнями щодо токсичності, енергетичної щільності та ефекту пам'яті. Вибір Ni-Cd батарей доцільний у тих випадках, коли пріоритетом є довговічність та стабільність роботи системи, а питання маси, об'єму та екології можуть бути вирішені відповідними технічними заходами.

Flow-батареї або ж аккумулятори на основі рідкого електроліту

Проточні батареї, або Flow-batteries, є одним із перспективних типів аккумуляторних систем для накопичення електричної енергії, особливо в масштабах великих сонячних електростанцій та енергетичних комплексів. Основною відмінністю проточних батарей від традиційних хімічних аккумуляторів є те, що енергія зберігається не у твердих електродах, а у рідких електролітах, які циркулюють у замкненій системі через електрохімічну комірку під час процесів заряджання та розряджання.

Конструктивно Flow-battery складається з двох резервуарів, заповнених рідкими електролітами з активними хімічними компонентами, та електрохімічного реактора, у якому відбувається обмін електронів між електролітами через іонообмінну мембрану. Під час розряджання електроліт одного типу окислюється, а іншого – відновлюється, виробляючи електричний струм для живлення споживачів або накопичення надлишкової енергії сонячних панелей. Під час заряджання електрохімічні реакції відбуваються у зворотному напрямку, відновлюючи хімічний потенціал електролітів.

Проточні батареї характеризуються рядом ключових переваг, які роблять їх особливо перспективними для застосування у сонячних електростанціях:

Масштабованість та гнучкість ємності – обсяг накопичуваної енергії визначається розміром резервуарів з електролітом, що дозволяє проектувати системи будь-якої потужності без зміни електрохімічного реактора.

Тривалий термін служби – електроліти не руйнуються під час циклів заряд-

розряд, а електрохімічний реактор практично не піддається деградації, що забезпечує десятки тисяч циклів без істотного зниження ємності.

Глибокий розряд без шкоди для ресурсу – Flow-battery може використовувати весь об'єм електроліту, забезпечуючи практично повний розряд без втрати ресурсу батареї, що є значною перевагою перед свинцево-кислотними та літій-іонними акумуляторами.

Висока безпека та низька токсичність – більшість проточних систем використовують водні електроліти або безпечні хімічні сполуки, що знижує ризик пожежі або токсичного впливу, властивого літій-іонним батареям.

Разом із перевагами, проточні батареї мають низку особливостей та обмежень, що впливають на їхнє застосування:

Складність та вартість системи – конструкція з резервуарами, насосами та мембранами потребує значних капіталовкладень та технічної підтримки, що збільшує початкову вартість встановлення.

Нижча енергетична щільність – через використання рідких електролітів, Flow-battery займає значно більший об'єм на одиницю зберіганої енергії у порівнянні з літій-іонними батареями, що обмежує їх використання у компактних системах.

Необхідність технічного обслуговування – системи потребують регулярного контролю рівня електроліту, герметичності резервуарів та працездатності насосів, що підвищує вимоги до експлуатаційного персоналу.

Енергетичні втрати на циркуляцію електроліту – робота насосів для переміщення рідких електролітів призводить до додаткових витрат енергії та дещо знижує загальний ККД системи.

Проточні батареї особливо доцільні для великих сонячних станцій та енергетичних комплексів із високою потребою у накопиченні енергії на тривалий час. Вони дозволяють ефективно балансувати вироблення електроенергії у пікові години та подавати її у періоди низького сонячного випромінювання, зменшуючи залежність від зовнішніх енергомереж та підвищуючи стабільність електропостачання. Flow-battery також активно розглядаються для інтеграції у

«розумні мережі» (smart grid), де їх здатність до масштабування та довговічність є критичними перевагами.

Таким чином, проточні батареї представляють собою інноваційне рішення для зберігання енергії у сонячних електростанціях, поєднуючи високий ресурс циклів, гнучкість масштабування, безпеку та можливість глибокого розряду. Незважаючи на відносно низьку енергетичну щільність та вищі капітальні витрати, Flow-battery стають все більш привабливим рішенням для великих і середніх систем відновлюваної енергетики, забезпечуючи стабільність, надійність та ефективність використання сонячної електроенергії.

Висновок до розділу 1

Проведений аналіз основних компонентів сонячних енергетичних систем дозволив систематизувати знання про сучасні технології генерації, накопичення та управління електроенергією, а також визначити ключові характеристики, що впливають на ефективність та надійність роботи систем. У процесі дослідження були розглянуті різні типи сонячних панелей, колекторів та акумуляторних батарей, що дозволяє зробити комплексні висновки щодо їхньої придатності до використання в конкретних умовах експлуатації та для різних масштабів енергетичних установок.

Сонячні панелі, як основний компонент перетворення сонячної енергії у електричну, демонструють значну різноманітність у конструктивних рішеннях та ефективності. Монокристалічні модулі характеризуються високим ККД та компактними габаритами, що робить їх оптимальними для обмежених площ та систем з високими вимогами до продуктивності. Полікристалічні панелі відзначаються меншими витратами на виробництво та достатньо високим ККД, що забезпечує їх популярність у комерційних та промислових проектах. Тонкоплівкові панелі мають нижчу ефективність, проте їхні гнучкі конструкції та висока адаптивність до різних поверхонь дозволяють застосовувати їх у нестандартних архітектурних рішеннях та для масштабних сонячних

електростанцій з низькими вимогами до щільності енергії. Аналіз сонячних колекторів показав, що їх використання є доцільним у гібридних системах та для забезпечення теплових потреб, тоді як активні і пасивні конструкції відрізняються складністю монтажу та технічними характеристиками.

Окрему увагу було приділено системам накопичення енергії, оскільки ефективність сонячної електростанції безпосередньо залежить від здатності акумулювати надлишкову енергію та забезпечувати безперервне електропостачання. Свинцево-кислотні батареї демонструють високу доступність та простоту експлуатації, однак мають обмежену циклічність та низьку енергетичну щільність. Літій-іонні батареї забезпечують високу щільність енергії, значну кількість циклів та мінімальні потреби в обслуговуванні, проте їхня висока вартість та вимоги до контролю температурного режиму обмежують широке впровадження у малих автономних системах. Нікель-кадмієві батареї характеризуються високою надійністю та здатністю витримувати глибокі розряди і низькі температури, але ефект пам'яті та токсичність кадмію зменшують їх практичну привабливість. Проточні батареї (Flow-batteries) забезпечують тривалу циклічність, гнучкість масштабування та безпеку експлуатації, проте потребують значних капіталовкладень та займають більший об'єм, що робить їх доцільними переважно для великих комерційних або промислових станцій.

Порівняльний аналіз компонентів показав, що вибір конкретного типу сонячної панелі та акумулятора залежить від декількох ключових факторів: доступності фінансових ресурсів, вимог до глибини розряду та циклічності, обмежень щодо площі та маси системи, кліматичних умов та очікуваного терміну служби. Для невеликих автономних систем найбільш оптимальним рішенням залишаються свинцево-кислотні батареї та монокристалічні панелі, тоді як для комерційних чи промислових установок доцільно застосовувати літій-іонні або проточні батареї, комбіновані з монокристалічними або полікристалічними панелями.

Важливим аспектом є інтеграція різних компонентів у єдину систему

управління енергією, що дозволяє оптимізувати роботу сонячної електростанції, забезпечувати баланс між виробництвом і споживанням електроенергії та продовжувати ресурс батарей. Розробка алгоритмів управління, контролю та моніторингу є критичною для забезпечення довготривалої надійної роботи систем та максимального використання потенціалу відновлюваних джерел.

Отже, проведений аналіз підтверджує, що сучасні сонячні енергетичні системи потребують комплексного підходу до вибору та поєднання компонентів. Врахування технічних характеристик, економічних факторів та умов експлуатації дозволяє підвищити ефективність, надійність та довговічність системи. Перспективи розвитку сонячної енергетики пов'язані із впровадженням високоефективних панелей, інноваційних систем накопичення енергії та інтелектуальних систем управління, що забезпечує стабільний та екологічно безпечний розвиток відновлюваних джерел енергії в умовах сучасної енергетики.

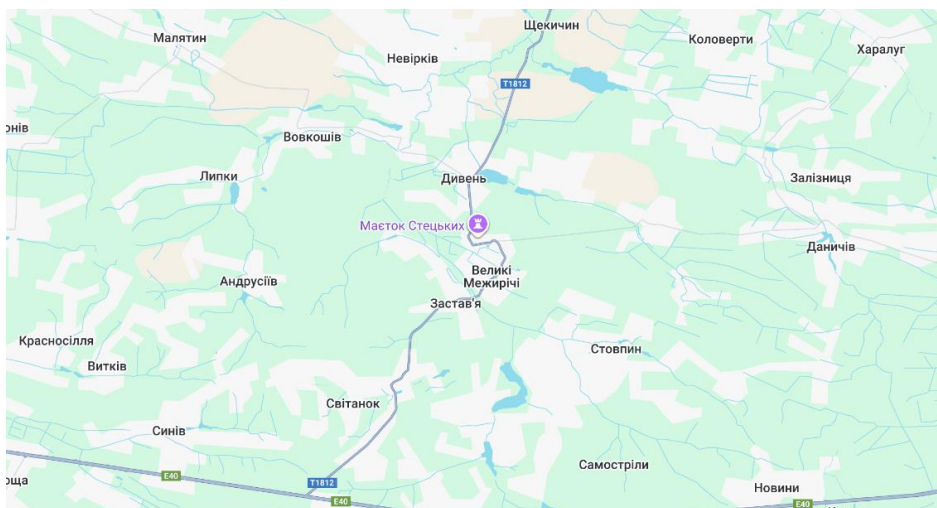
Таким чином, основні компоненти сонячних електростанцій, включаючи панелі, колектори та акумуляторні системи, виступають взаємодоповнюючими елементами, ефективність яких визначає загальну продуктивність та надійність системи. Раціональний вибір і комбінація цих компонентів є ключовим фактором успішного проектування сонячних енергетичних систем різних масштабів, що сприяє підвищенню енергетичної безпеки, скороченню викидів вуглецю та інтеграції відновлюваних джерел енергії у сучасну енергетичну інфраструктуру.

РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТНІ РОЗРАХУНКИ КОЛЕКТОРІВ ТА ФОТОМОДУЛІВ

2.1 Географія розташування та характеристика об'єкта

Будинок, призначений для встановлення сонячної станції, розташований у селі Великі Межиричі Рівненського району Рівненської області. Відстань до обласного центру, міста Рівне, становить 12 км. Великі Межіричі (пол. Międzyrzec Konecki) — село в Україні, у Рівненському районі Рівненської області. Центр Великомежирицької сільської громади. Населення — близько 2 тисяч осіб; перша згадка — 1544 рік. Назва пішла від розташування села між річками («межи річок»). До 1965 року мало назву Межиріч і Межирічі, а за польського правління — Межиріч Корецький. У селі діють гімназія, спеціальна школа-інтернат, будинок культури, дільнична лікарня. Упродовж 1940—1959 рр. було районним центром Межиріцького району.

Географічні координати: $50^{\circ}39'24''$ північної широти та $26^{\circ}51'53''$ східної довготи. На рисунку 2.1 наведено зображення об'єкту з інформаційного ресурсу [15].



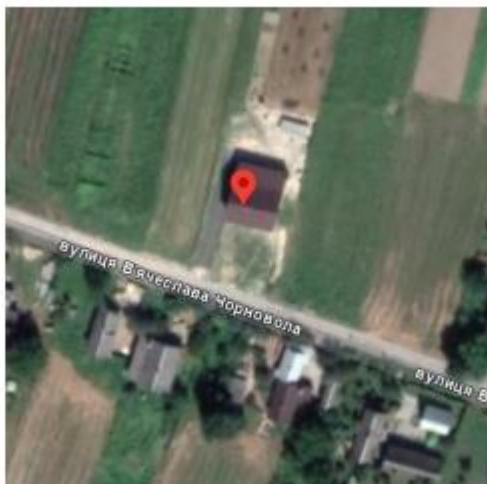


Рисунок 2.1 – Розташування будинку для встановлення сонячної станції [15]

У будинку проживає 3 людини. Орієнтація частини даху, що планується для встановлення сонячної станції, – на південь. Розміри даху: довжина – 13,2 м, ширина – 7,35 м.

2.2 Регіональні умови клімату

Географічне положення Рівненської області відносить її до помірного кліматичного поясу. Для регіону характерний помірно-континентальний клімат: літо тепле та вологе, зима – м'яка.

Більша частина області, зокрема північна її частина, розташована в межах Поліської низовини (132–200 м), для якої характерні низовини, плоскохвилясті акумулятивні рівнини з широкими річковими долинами та заболоченими вододілами. Південна частина області відноситься до Волинської височини (200–342 м), де переважають підвищені, хвилясті лесові рівнини, розділені численними річками на окремі плато, а також ярами та балками [16].

Середня річна кількість опадів у Рівненській області становить 550–600 мм. Як показано в таблиці 2.1, найбільша їх інтенсивність у 2023 році спостерігалася в червні–липні у вигляді злив, а також у листопаді. Восени, взимку та на весні опади менш інтенсивні. Детальніші дані наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Кліматичні дані.

Місяць	Середня температура, °С	Максимальна температура, °С	Мінімальна температура, °С	Всього опадів, мм	Макс. глибина снігового покриву, см
1	+0,9	+13,8	-4,3	32,3	2
2	-0,4	+6,6	-12,3	29,2	2
3	+3,4	+17,8	-6	72,1	4
4	+7,7	+19,5	-4	71,7	5
5	+14,2	+25,9	-0,7	7,6	-
6	+17,9	+28,8	+4,7	83,1	-
7	+20	+32,9	+9	131,9	-
8	+21,5	+36,2	+9,1	42	-
9	+17,8	+28,2	+7,4	13,7	-
10	+11,3	+25	-2,7	90,9	-
11	+3,1	+15,3	-9,6	48,1	7
12	+0,4	+9,4	-12	49,1	12

Основним джерелом енергії для сонячних колекторів та фотомодулів є сонячна радіація. Найбільша кількість сонячної енергії надходить у весняно-літній період. У таблиці 2.2 наведено щомісячні значення рівня сонячної радіації.

Таблиця 2.2. Щомісячний рівень сонячної радіації для кута нахилу 45° [18]

Місяць	Рівень сонячної радіації, кВт·год/м ²
Січень	38,49
Лютий	58,89
Березень	100,73
Квітень	150,37
Травень	159,78
Червень	168,32
Липень	170,89
Серпень	174,34
Вересень	138,06
Жовтень	98,01
Листопад	45,32
Грудень	34,64
Річна інсоляція	1337,84

2.3 Основа вибору сонячного колектора. Обчислення ефективності

Сонячний колектор призначений для поглинання сонячної енергії та перетворення її на теплову, яка передається теплоносію. Для цієї магістерської роботи обрано вакуумний сонячний колектор AXIOMA energy AX-30HP24, що може експлуатуватися протягом усього року. Колектор складається з 30 трубок, покритих трьома шарами високоселективного покриття ALN-AIN-SS/Cu. Завдяки збільшеному конденсатору (24 мм) підвищується коефіцієнт теплопередачі, що робить систему більш ефективною навіть при низьких температурах навколишнього середовища. На рис. А1 у додатку А наведено зовнішній вигляд колектора.

Вакуумний сонячний колектор AX-30HP24 включає такі компоненти:

вакуумні трубки з трьома шарами високоселективного покриття та мідною трубкою типу heat-pipe; теплообмінник; алюмінієву раму; термопасту.

Цей тип геліоколекторів є найефективнішим і особливо добре проявляє себе при помірних температурах навколишнього середовища. Він оптимально підходить для гарячого водопостачання з температурою води в діапазоні 50–95°C. Завдяки розміщенню селективного абсорбера у вакуумній трубці тепловтрати мінімальні, що робить систему ефективною для використання в помірному кліматі. Технічні характеристики колектора АХІОМА energy АХ-30НР24 наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні параметри сонячного колектора АХІОМА energy АХ-30НР24 [19]

Модель	АХ-30НР24
Загальна площа	4,901 м ²
Площа апертури	2,791 м ²
Робочий тиск	6 бар
ККД	76,9%
Діапазон температур навколишнього середовища	від -40 до +60 °С
Об'єм теплоносія	2,3 л
Порожня вага	106 кг
Кількість трубок	30
Покриття	ALN-AIN-SS/Cu
Розмір трубки	діаметр – 58 мм, довжина – 1800 мм

2.4 Визначення необхідної кількості сонячних колекторів на основі характеристик потреби господарства

У цій частині кваліфікаційної роботи розглядається методика оцінки енергії, яку може забезпечити сонячний колектор для гарячого водопостачання. Важливо відзначити, що колектори не використовуються для опалення, а лише для нагрівання води.

Для визначення орієнтовної кількості енергії враховуються такі параметри: середньомісячна сонячна активність у регіоні встановлення системи; поглинальна площа геліоколектора; коефіцієнт корисної дії (ККД) колектора; кут нахилу панелей відносно сонячного випромінювання.

За статистичними даними, на нагрівання гарячої води одне домогосподарство потребує приблизно 2–4 кВт·год енергії на людину на день. Для оцінки енергії, що виробляє колектор, використовуються:

рівень сонячної інсоляції у регіоні;

апертурна площа колектора (площина, що поглинає сонячне випромінювання);

ККД колектора, який приймається 80–85%;

кут нахилу апертурної поверхні, що визначається географічною широтою місця встановлення.

Рівень інсоляції визначається за даними інформаційного ресурсу [18], який за координатами місця встановлення та кутом нахилу розраховує щомісячну радіацію на 1 м². Апертурна площа колектора зазначена у паспортних даних виробника та становить 2,791 м² для всього колектора АХІОМА energy АХ-30НР24, що складається з 30 трубок.

Таким чином, для визначення поглинаючої площі однієї скляної трубки можна використати простий розрахунок:

$$S_{1m} = \frac{S_a}{n} = \frac{2,791}{30} = 0,093 \text{ м}^2, \quad (2.1)$$

де $S_a = 2,791 \text{ м}^2$ – площа апертури колектора; $n = 30 \text{ шт}$ – кількість трубок в колекторі.

Для визначення необхідної кількості трубок, що утворюють один квадратний метр поглинальної поверхні колектора, слід привести показник до цього формату, оскільки розрахунок сонячної енергії завжди ведеться на 1 м². Таким чином, отримуємо:

$$n_{1,м^2} = \frac{1}{S_{1м}} = \frac{1}{0,093} = 10,75 \approx 11. \quad (2.2)$$

Щоб встановити, скільки трубок потрібно для генерації потрібного обсягу теплової енергії, необхідно обчислити продуктивність однієї трубки. Обчислення проводиться за відповідною формулою:

$$E_{1м} = S_{1м} \cdot E \cdot \eta. \quad (2.3)$$

З табл. 2.2 беремо значення річної інсоляції 1 м², яке становить 1338 кВт·год/м². Тоді річний виробіток однієї трубки становить:

$$E_{1м} = 0,093 \cdot 1337,84 \cdot 0,85 = 124,42 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (2.4)$$

де $E = 1337,84 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$ – інсоляція 1 м² для даного регіону (річна); $\eta = 85\%$ – ККД колектора.

Виробництво теплової енергії з 1 м² сонячної геліосистеми становить:

$$E_{1,м^2} = E_{1м} \cdot n_{1,м^2} = 124,42 \cdot 11 = 1368,62 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (2.5)$$

де $n_{1,м^2}$ – кількість трубок, які утворюють 1 м² поглинальної площі колектора.

У такому випадку енергія, що виробляється колектором АХІОМА energy АХ-30НР24 з апертурною площею 2,791 м², дорівнює:

$$E_k = E_{1,м^2} \cdot S_a = 1368,62 \cdot 2,791 = 3819,82 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (2.6)$$

В середньому для нагріву води однієї особи витрачається 2–4 кВт·год енергії на день. Тому, якщо сонячний колектор, що складається з 30 трубок і має апертурну площу 2,791 м², працюватиме протягом року в селі Грабів, можна очікувати отримання наступної кількості енергії:

$$E_{\text{день}} = \frac{E_k}{n_{\text{днів}}} = \frac{3819,82}{365} = 10,46 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (2.7)$$

де $n_{\text{днів}} = 365 \text{ днів}$ – кількість днів у році.

Отже, розрахункова енергія, яку може виробляти сонячний колектор

АХІОМА energy АХ-30НР24, є достатньою для забезпечення гарячою водою трьох людей, що відповідає складу родини на даному об'єкті.

Слід зазначити, що отримані дані є орієнтовними. У реальних умовах продуктивність може знижуватися через похмуру погоду або інші атмосферні фактори. Тому для підстрахування площу колектора інколи приймають на 20% більшу, ніж розрахункова, щоб гарантувати необхідну кількість енергії.

Оптимальний кут нахилу колектора визначається широтою місця встановлення. В даному випадку широта ділянки становить 50° , а нахил даху – 45° , що забезпечує близьке до оптимального положення для колектора. Допускаються відхилення $\pm 10^\circ$ від широти, які незначно впливають на продуктивність геліосистеми, тому встановлений кут є прийнятним.

На рис. 2.2 показано розміщення двох сонячних колекторів АХІОМА energy АХ-30НР24 на даху, із збереженням місця для майбутньої установки сонячних панелей, що дозволяє поєднувати гаряче водопостачання та виробництво електроенергії на одній покрівлі.

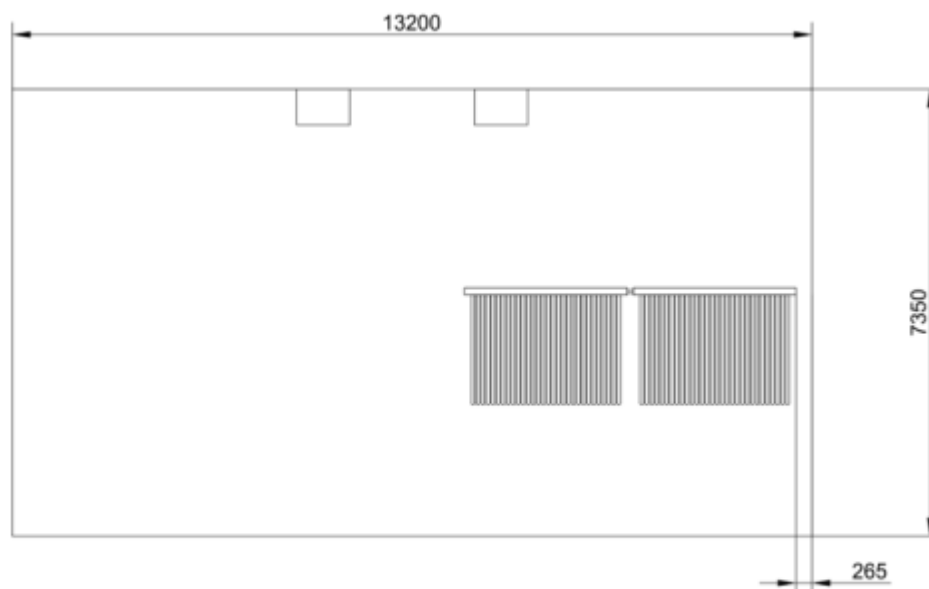


Рисунок 2.2 – Розміщення сонячних колекторів на даху

2.5 Визначення потреби у сонячній електрогенерації та підбір типу і кількості панелей

Фотомодуль виконує функцію перетворення сонячної радіації на електричну енергію, що є ключовим компонентом будь-якої сонячної електростанції. Для потреб цієї кваліфікаційної роботи обрано монокристалічні фотомодулі JA Solar JAM72S30-550/MR, що складаються з 72 комірок типу 11BB PERC і забезпечують номінальну потужність 550 Вт. Продуктивність цих панелей досягає 21,3%, що ставить їх серед високоефективних рішень на ринку.

Завдяки технології Half-cell, фотомодуль демонструє покращену ефективність навіть при частковому затіненні, зменшуючи ризик появи гарячих точок, які можуть пошкодити панель. Крім того, модулі JA Solar відрізняються стабільною продуктивністю при підвищених температурах і високим рівнем механічної стійкості. Для захисту поверхні використано міцне загартоване скло, а панель змонтована в алюмінієву раму з діелектричним покриттям.

Виробник надає 12 років гарантії на сам фотомодуль та 25 років гарантії на збереження потужності, що забезпечує довготривалу надійність системи.

У таблицях 2.4–2.5 наведені основні характеристики модуля JA Solar JAM72S30-550/MR, електричні параметри яких визначено при стандартних умовах: інсоляція 1000 Вт/м², температура комірки 25°C, спектральний клас AM 1,5G [20].

Таблиця 2.4 – Основні електричні параметри фотомодуля JA Solar JAM72S30-550/MR [20]

Параметр	Значення
1	2
Максимальна потужність	550 Вт
Напруга холостого ходу	49,9 В
Напруга точки макс. потужності	41,96 В
Струм короткого замикання	14 А
Струм точки макс. потужності	13,11 А
Ефективність модуля	21,3%
Температурний коеф. по напрузі	-0,275%/°C
Температурний коеф. по струму	+0,045%/°C
Відхилення номінальної потужності	0~+5 Вт
Максимальна напруга системи	1000 В/1500 В

Таблиця 2.5 – Механічні параметри та робочі умови фотомодуля JA Solar JAM72S30-550/MR

Параметр	Значення
Тип комірки	Монокристалічний
Розмір (ДхШхГ)	2278x1134x35 мм
Маса	28,1 кг
Коробка з'єднань	IP68, 3 діоди
Поперечний переріз кабелю	4 мм ²
Робоча температура	-40°C~+85°C
Клас безпеки	II
Пожежостійкість	UL тип I

2.6 Визначення потужностей, які необхідні господарству та обрання відповідного інвертора

Інвертор є ключовим компонентом сонячної електростанції, оскільки він забезпечує перетворення постійного струму, що надходить від фотомодулів, у змінний струм, необхідний для живлення побутових або промислових споживачів. Для цієї кваліфікаційної роботи обрано однофазний гібридний інвертор LuxPower SNA5000.

Модель LuxPower SNA5000 є оптимальним рішенням для домашніх сонячних станцій, забезпечуючи надійну і гнучку роботу системи. Інвертор може виконувати функцію як основного джерела електроенергії, повністю покриваючи потреби домогосподарства, так і служити резервним живленням. Наявність двох MPPT трекерів дозволяє підключати панелі з різних площин або використовувати два різні типи фотомодулів, що значно розширює можливості розміщення системи.

Завдяки низькій стартовій напрузі, система починає виробляти електроенергію раніше протягом дня, що підвищує загальний добовий виробіток. Інвертор працює як із літій-іонними акумуляторами, так і з більш економічними свинцево-кислотними батареями. У разі потреби вбудований АВР дозволяє безпосередньо підключати генератор і управляти його роботою [21].

У таблицях 2.6–2.7 наведено технічні характеристики гібридного інвертора LuxPower SNA5000, а на рис. А3 додатку А показано його зовнішній вигляд.

Таблиця 2.6 – Електричні параметри інвертора LuxPower SNA5000 [21]

Параметр	Значення
Макс. вхідна потужність DC	8000 Вт
Кількість МРРТ, кількість входів	2, 1+1
Діапазон робочих напруг МРРТ	120-385 В
Стартова напруга	100 В
Максимальна напруга	480 В
Максимальний робочий струм МРРТ	17 А
Максимальний струм КЗ	25 А
Номінальна резервна потужність	5000 Вт
Максимальна потужність з мережі	8000 Вт
Час перемикання	<15 мс при самостійній роботі
ККД інвертора	93%
Тип підтримуваних АБ	Літієві та свинцево-кислотні
Номінальна напруга АБ	48 В
Макс. зарядний/розрядний струм	110 А

Таблиця 2.7 – Загальні параметри інвертора LuxPower SNA5000

Параметр	Значення
Розмір (ДхШхГ)	303x505x135 мм
Маса	14,5 кг
Захист	IP20
Температура навколишнього середовища	0-50°C
Тип охолодження	Активне
Шум	<50 дБ

2.7 Математичне моделювання гібридної сонячної електростанції

Гібридна сонячна станція характеризується здатністю працювати одночасно з акумуляторами та віддавати надлишок виробленої електроенергії в мережу. Принцип роботи полягає у пріоритетному забезпеченні споживача електроенергією: спочатку вся вироблена сонячними панелями енергія спрямовується на задоволення потреб будинку. Якщо виникає надлишок, він спрямовується на зарядку акумуляторних батарей (якщо вони розряджені). У випадку, коли споживання задоволене, а акумулятори повністю заряджені, надлишок електроенергії може передаватися в електромережу при наявності «зеленого» тарифу. При недостатній генерації від фотомодулів енергія може надходити з акумуляторів або безпосередньо з мережі, залежно від налаштувань системи.

Середньодобове споживання сім'ї становить приблизно 5 кВт·год. Для розрахунків потужність фотомодулів і інвертора визначають за найменш сприятливим періодом генерації — зимовим, коли коефіцієнт генерації приймаємо за 1, тобто станція 5 кВт виробляє лише 5 кВт·год протягом дня. Виходячи з цього, обираємо інвертор LuxPower SNA5000 потужністю 5 кВт та фотомодулі JA Solar JAM72S30-550/MR потужністю 550 Вт.

Щоб максимально використати потенціал фотомодулів, до інвертора підключають більше панелей, ніж його номінальна потужність, враховуючи при цьому розміри даху та фізичні габарити панелей. В електричних характеристиках інвертора зазначено, що можна підключити панелі загальною потужністю до 8000 Вт. В умовах цієї системи було вирішено обмежитися потужністю 6600 Вт, що відповідає 12 панелям по 550 Вт.

Панелі підключаються двома стрінгами по 6 фотомодулів кожен. Зважаючи на кут нахилу даху 45° , фотомодулі встановлюються під таким же кутом, що забезпечує оптимальний захід сонячного випромінювання. На рис. 2.3 наведено схему підключення стрінгів до інвертора.

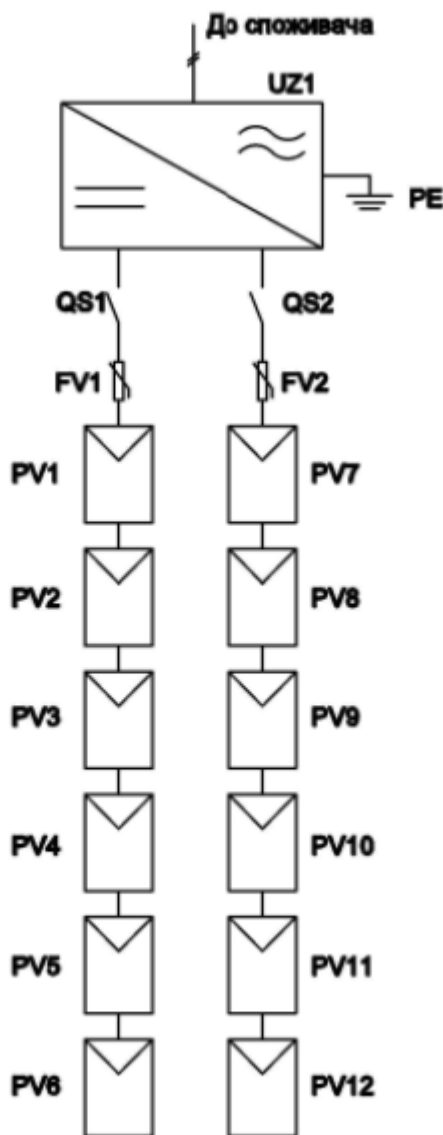


Рисунок 2.3 – Схема підключення стрінгів до інвертора

Щоб інвертор працював стабільно та мав тривалий ресурс, при підключенні фотомодулів потрібно враховувати не лише сумарну потужність, а й такі ключові параметри, як струм короткого замикання та напруга холостого ходу.

Перш за все, при підключенні необхідно перевіряти напругу холостого ходу (V_{oc}) з урахуванням температурного коефіцієнта. Розрахунок проводять для мінімальної очікуваної температури, яку часто спостерігають в Україні — -20°C. Вибір мінімального значення обґрунтований тим, що при зниженні температури напруга фотомодуля значно зростає. Спершу визначаємо напругу холостого ходу для однієї панелі, враховуючи температурний коефіцієнт:

$$V_t = V_{xx} \cdot \left(1 + \frac{k_u}{100} \cdot (t - T_{stc}) \right) = 49,9 \cdot \left(1 + \frac{-0,275}{100} \cdot (-20 - 25) \right) = 56,176 \text{ В}, \quad (2.8)$$

де $V_{xx} = 49,9 \text{ В}$ – напруга холостого ходу панелі; $k_u = -0,275 \% / ^\circ\text{C}$ – температурний коефіцієнт по напрузі; $t = -20 ^\circ\text{C}$ – середнє значення мінімальної температури навколишнього середовища для України; $T_{stc} = 25 ^\circ\text{C}$ – температура комірки при ідеальних лабораторних умовах.

Далі отримане значення множимо на кількість панелей у стрінгу, щоб переконатися, що сумарна напруга не перевищує допустимі межі інвертора.

$$56,176 \cdot 6 = 337,058 \text{ В}. \quad (2.9)$$

У нашому випадку максимальна допустима напруга DC-сторони інвертора становить 480 В, а розрахункова напруга одного стрінгу вийшла 337,058 В. Це свідчить, що кількість панелей у стрінгу обрана правильно. Крім того, інвертор працюватиме найбільш ефективно, якщо напруга знаходиться в діапазоні 120–385 В, що якраз відповідає розрахованому значенню.

$$U_{xx\text{ pv}} = 337,058 \text{ В} < U_{xx\text{ inv}} = 480 \text{ В}. \quad (2.10)$$

Перевірку також проводять за струмом короткого замикання (I_{sc}). Температурний коефіцієнт для струму дуже малий, тому ним можна знехтувати. Головне — переконатися, що струм короткого замикання фотомодуля 14 А не перевищує максимальний допустимий 25 А для інвертора. Оскільки розрахунковий струм менший за допустимий, можна підтвердити правильність вибору панелей та їхньої кількості:

$$I_{sc\text{ pv}} = 14 \text{ А} < I_{sc\text{ inv}} = 25 \text{ А}. \quad (2.11)$$

Оскільки розрахунковий струм менший за допустимий, можна підтвердити правильність вибору панелей та їхньої кількості.

У табл. 2.8 наведено розрахунковий щомісячний виробіток електроенергії сонячними панелями, а також сумарний річний показник, що дозволяє оцінити потенційну продуктивність станції.

Таблиця 2.8 – Розрахунковий виробіток електроенергії сонячними панелями [18]

Місяць	Вироблена електроенергія, кВт·год
Січень	221,83
Лютий	339,68
Березень	569,78
Квітень	804,94
Травень	828,08
Червень	859,29
Липень	866,74
Серпень	887,11
Вересень	728,9
Жовтень	537,57
Листопад	252,46
Грудень	196,46
Річний виробіток е/е	7092,84

На рис. 2.8 представлено графік виробленої фотомодулями протягом року електроенергії.

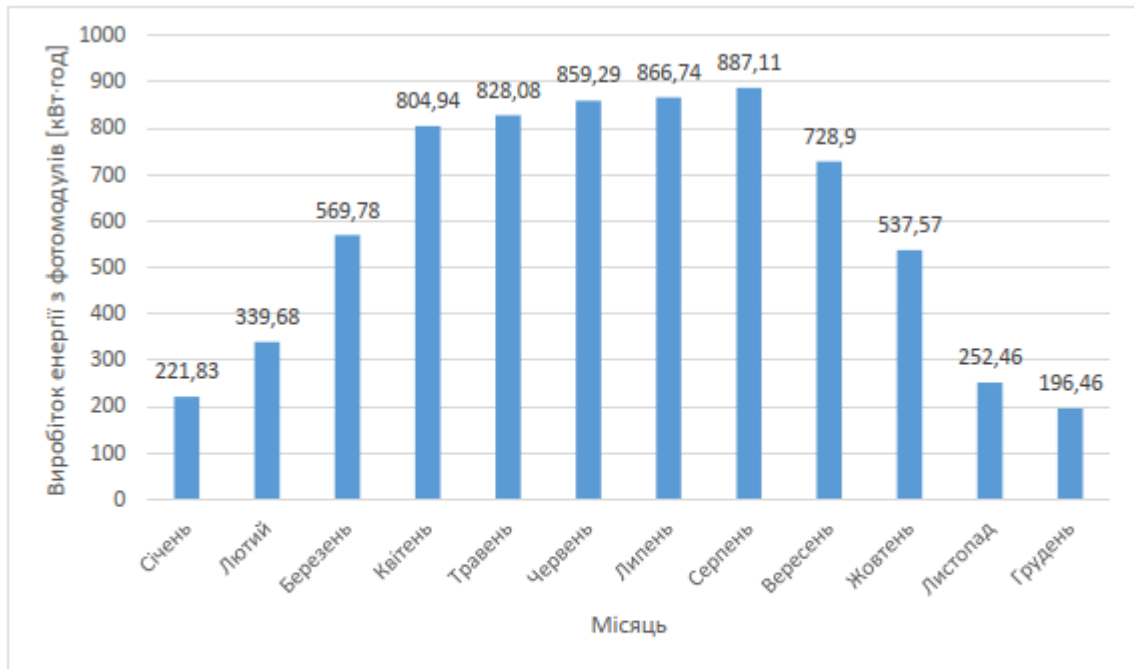


Рисунок 2.4 – Графік генерації електроенергії протягом року [18]

На рис. 2.5 представлено розміщення сонячних колекторів та фотомодулів.

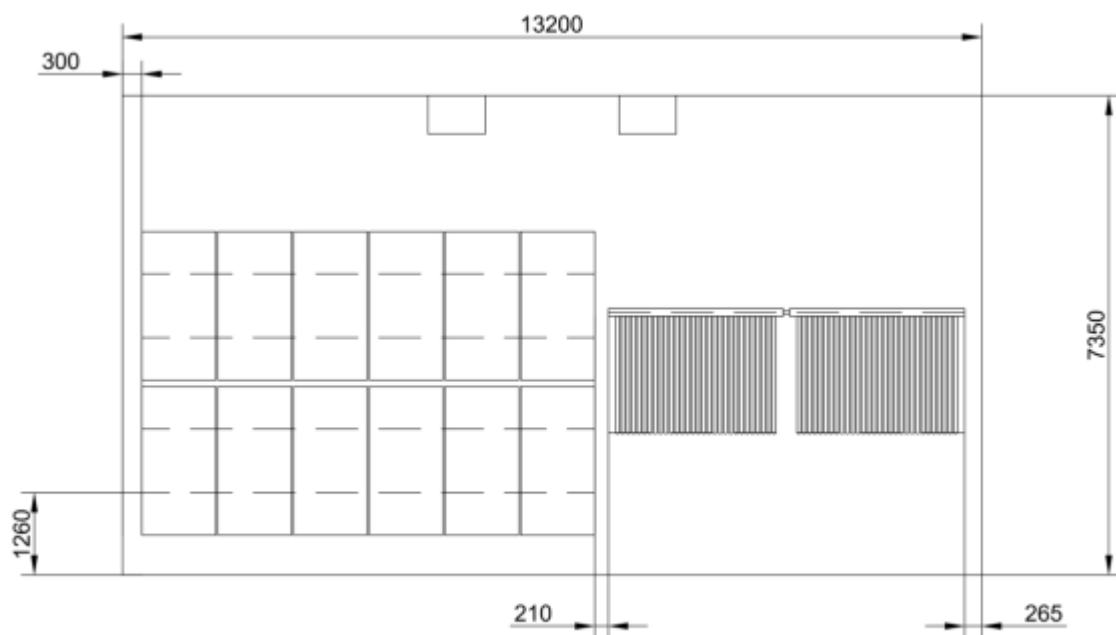


Рисунок 2.5 – Розміщення сонячних колекторів та фотомодулів на даху

Висновок до розділу 2

Проведений аналіз кліматичних умов обраного регіону показав, що він є сприятливим для розміщення автономної або гібридної сонячної електростанції. Зокрема, дослідження річної сонячної радіації та характеристик інсоляції дозволило визначити оптимальні параметри розташування та нахилу фотомодулів для забезпечення максимальної продуктивності системи. Встановлено, що кут нахилу даху 45° є оптимальним для даного регіону, оскільки він забезпечує найбільш ефективне поглинання сонячного випромінювання протягом року, враховуючи сезонні коливання інсоляції та орієнтацію будівлі.

Розрахунки показали, що середній річний показник сонячної радіації складає $1338 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$. На основі цього значення було проведено підбір необхідної кількості сонячних колекторів AXIOMA energy AX-30HP24 для ефективного використання доступної сонячної енергії. Визначено, що для забезпечення оптимальної роботи системи достатньо встановити 2 одиниці даних колекторів. Цей вибір підтверджує економічну доцільність та технічну обґрунтованість проекту, оскільки забезпечує необхідний обсяг теплової та електричної енергії при мінімальних витратах на обладнання та його монтаж.

Для задоволення середнього добового споживання електроенергії в сім'ї, що складає близько $5 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ на день, було обрано гібридний інвертор LuxPower SNA5000 потужністю 5 кВт . Підбір інвертора здійснено з урахуванням не лише середньодобового споживання, але й максимальної потужності фотомодулів, що дозволяє забезпечити стабільну роботу системи навіть у періоди пікового навантаження. До інвертора підключено фотомодулі JA Solar JAM72S30-550/MR загальною потужністю 6600 Вт . Проведені перевірки підтвердили правильність та доцільність такого підбору, оскільки потужність сонячних модулів відповідає вимогам інвертора і забезпечує безперебійне живлення споживачів при стандартних умовах експлуатації.

Важливим аспектом є економічна ефективність обраної конфігурації сонячної станції. Оскільки вироблена електроенергія перевищує фактичне добове

споживання сім'ї, надлишок енергії може бути реалізований за «зеленим» тарифом, що дозволяє отримувати додатковий прибуток від генерації сонячної електроенергії. Такий підхід не лише підвищує рентабельність проекту, але й стимулює використання відновлюваних джерел енергії, сприяючи скороченню витрат на електроенергію та зменшенню навантаження на традиційні джерела електропостачання.

Проведений аналіз демонструє, що системний підхід до проектування сонячної електростанції, який включає вивчення кліматичних умов, визначення оптимального нахилу даху, підбір фотомодулів та інвертора, дозволяє забезпечити ефективну та стабільну роботу системи. Комплексне оцінювання показало, що обрана конфігурація відповідає потребам сім'ї, забезпечує економічну ефективність та дозволяє інтегрувати станцію у національну електромережу з використанням механізму «зеленого» тарифу.

Таким чином, реалізація сонячної електростанції за зазначеною схемою є технічно обґрунтованою, економічно вигідною та екологічно доцільною. Отримані результати можуть бути використані як основа для проектування аналогічних об'єктів у регіоні з подібними кліматичними умовами. Висновки розділу підкреслюють важливість комплексного аналізу та інтегрованого підходу до підбору компонентів сонячної електростанції для забезпечення стабільного та ефективного виробництва електроенергії з відновлюваних джерел.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ТА РОЗРАХУНОК НАКОПИЧУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Визначення необхідного об'єму зберігання електроенергії

Підбір ємності акумуляторних батарей здійснюється з урахуванням фактичного споживання електроенергії на об'єкті, тобто тих споживачів, які необхідно забезпечити живленням у будь-яких умовах. У середньому добове споживання сім'ї складає 5 кВт·год. У разі відсутності електропостачання члени сім'ї готові обмежити використання деяких приладів, зменшивши споживання до 3,5 кВт·год на добу. Для резервного забезпечення електроенергією на 2 доби для сім'ї з трьох осіб, приймаємо загальне споживання 7 кВт·год.

При розрахунку необхідно враховувати кілька ключових коефіцієнтів. Один із них — коефіцієнт корисної дії (ККД) інвертора, який показує ефективність вбудованого зарядного пристрою при заряджанні акумуляторів. Для LuxPower SNA5000 цей показник становить 93%. На основі цього ККД розраховується загальна кількість енергії, яку слід накопичити в акумуляторі для забезпечення стабільної роботи системи та ефективного використання інвертора:

$$E_{\text{накоп}} = E_{\text{спож}} \cdot \eta_{\text{інв}} = \frac{7}{0,93} = 7,527 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (3.1)$$

де $E_{\text{спож}} = 7 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ — споживання електроенергії за 2 дні; $\eta_{\text{інв}} = 93\%$ — коефіцієнт корисної дії інвертора.

У розрахунках також слід враховувати коефіцієнт температурного впливу на ємність батарей. Для свинцево-кислотних акумуляторів цей параметр є критичним, адже при зниженні температури їхня ємність помітно зменшується. На обраному об'єкті будуть використані літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумулятори, у яких подібної залежності практично немає. Проте варто пам'ятати, що при зниженні температури нижче $8\text{--}10^\circ\text{C}$ батарея значно обмежує струм заряду та розряду. Оптимально підтримувати акумулятори при кімнатній температурі, що забезпечує їх стабільну та ефективну роботу без перебоїв у системі.

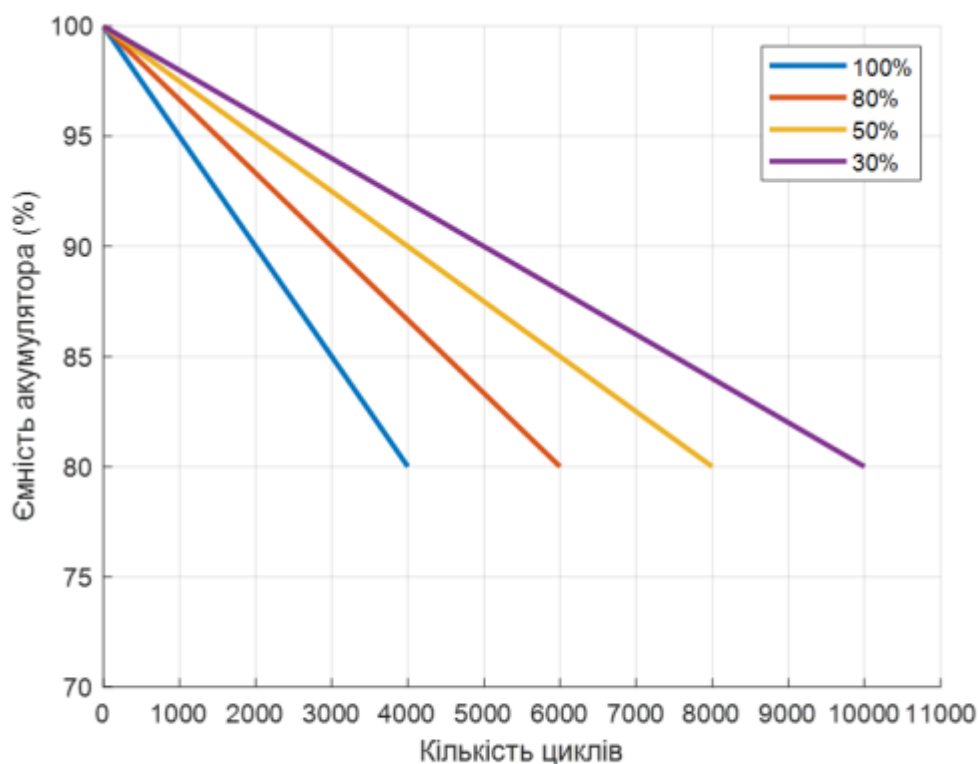
Ще одним критичним показником є дозволена глибина розряду (DoD). Для

літєвих акумуляторів вона становить 80%, тобто батарею можна розряджати до 20% залишкової ємності без негативного впливу на хімічні властивості та експлуатаційні характеристики. Повне розрядження до нуля суттєво шкодить акумулятору та вважається глибоким розрядом. Відповідно, для наших розрахунків приймаємо глибину розряду 80%, на основі чого визначається необхідна ємність акумуляторних батарей для стабільного живлення об'єкта.

$$E_{AKB} = \frac{E_{наконт} \cdot \tau}{DOD} = \frac{7,527 \cdot 1}{0,8} = 9,41 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (3.2)$$

де $\tau=1$ – коефіцієнт температурного зменшення ємності акумуляторних батарей; $DOD=80\%$ – глибина розряду акумуляторної батареї.

На рис. 3.1 наведено графічну залежність між кількістю робочих циклів акумулятора та втратою ємності до 80%, враховуючи різну глибину розряду для LiFePO₄ батарей.



Рисуюнок 3.1 – Вплив глибини розряду на кількість циклів

Для визначення потрібної кількості акумуляторів спершу необхідно обрати виробника та конкретну модель батареї, а також з'ясувати її номінальну ємність. У даній роботі обрана модель Dyness A48100, номінальна ємність якої складає 4,8 кВт·год. Виходячи з розрахованої потреби в акумуляторній ємності, визначаємо необхідну кількість одиниць батарей для забезпечення безперебійного живлення:

$$n = \frac{E_{\text{АКБ}}}{E_{\text{ном}}} = \frac{9,41}{4,8} = 1,96 \approx 2 \text{ шт}, \quad (3.3)$$

де $E_{\text{ном}} = 4,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ – номінальна ємність акумуляторної батареї.

Тоді сумарна ємність акумуляторних батарей становить:

$$E_{\text{сум}} = 4,8 \cdot 2 = 9,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (3.4)$$

Виходить що 2 акумуляторні батареї Dyness A48100 достатньо для покриття споживання родиною протягом 2 днів.

3.2 Вибір найбільш ефективної технології для зберігання електроенергії

Акумулятор служить для накопичення електроенергії, яка може бути використана під час відсутності електропостачання або для збереження надлишкової енергії від сонячних панелей. Для даної системи обрана літій-залізо-фосфатна батарея Dyness A48100.

LiFePO₄ акумулятори за останні роки здобули значну популярність у сфері енергетики, і це не випадково. У порівнянні зі звичайними літій-іонними та свинцево-кислотними батареями, вони забезпечують значно більшу кількість циклів заряд-розряд. Крім того, такі акумулятори вирізняються підвищеною безпекою, меншою схильністю до перегріву, вибуху чи займання. Вони дозволяють зберігати більше енергії щодо своєї маси та об'єму, а також характеризуються низьким рівнем саморозряду [22].

Вбудована система управління BMS автоматично контролює струм та інші параметри роботи батареї, обмежуючи їх у разі перевищення допустимих значень і тим самим захищаючи акумулятор від пошкоджень. Dyness A48100 може встановлюватися як вертикально, так і горизонтально, що забезпечує гнучкість

монтажу [23].

У таблицях 3.1–3.2 наведено основні характеристики акумулятора Dyness A48100, а на рис. А4 додатку А зображено його зовнішній вигляд.

Таблиця 3.1 – Основні електричні параметри акумуляторної батареї Dyness A48100 [23]

Параметр	Значення
Тип акумуляторної батареї	LiFePO ₄
Номінальна ємність	4,8 кВт·год
Номінальна ємність	100 А·год
Номінальна напруга	48 В
Напруга відключення заряду	54 В
Напруга відключення розряду	42 В
Рекомендований параметр С	0,5 С
Рекомендований струм заряду/розряду	50 А
Максимальний струм заряду/розряду	75 А

Таблиця 3.2 – Загальні параметри акумуляторної батареї Dyness A48100

Параметр	Значення
Маса	45 кг
Розмір (ДхШхВ)	504x597x155 мм
Допустима температура заряду	0-50°C
Допустима температура розряду	-20-50°C
Кількість циклів	>6000 циклів
Захист	IP20

3.3 Розрахунок об'ємів необхідної теплової енергії

Щоб зберігати надлишкову теплову енергію, вироблену протягом світлового дня, та використовувати її для нагрівання води в періоди відсутності сонячного випромінювання, застосовують бак-акумулятор. Об'єм бака визначається виходячи зі споживання гарячої води на одну особу. Для приватного будинку середнє споживання гарячої води на людину становить приблизно 100 л на добу [24]. У даному випадку в будинку проживає 3 особи, тому оптимальний об'єм бака-акумулятора – 300 л.

Для цього об'єкта обрано теплоакумулятор Termico об'ємом 300 л, оснащений утепленням. Висота бака становить 1750 мм, а матеріалом теплоізоляції слугує пінополіуретан, що забезпечує мінімальні теплові втрати [25].

Цей бак дозволяє ефективно накопичувати енергію, підтримувати стабільну температуру води та забезпечувати комфортне гаряче водопостачання навіть у вечірній та нічний час.

3.4 Реалізація схем підключень всього обладнання

Після проведення розрахунків та підбору фотомодулів, інвертора й акумуляторних батарей була сформована схема підключення електричного обладнання системи, що наведена на рис. 3.2. На схемі показано підключення фотомодулів із встановленими засобами захисту, які оберігають інвертор від перевантажень та коротких замикань.

На об'єкті передбачено перемикач і захист від імпульсних перенапруг, а також розміщено інвертор, акумулятор та плавкий запобіжник. Перед споживачем та підключенням до мережі встановлюється автоматичний вимикач і трипозиційний перемикач, що дозволяє підключати навантаження безпосередньо до електромережі. Для підвищення безпеки по стороні мережі обов'язково монтується пристрій захисту від імпульсних перенапруг.

Всі елементи системи піддаються обов'язковому заземленню, що забезпечує додатковий рівень безпеки при експлуатації сонячної електростанції.

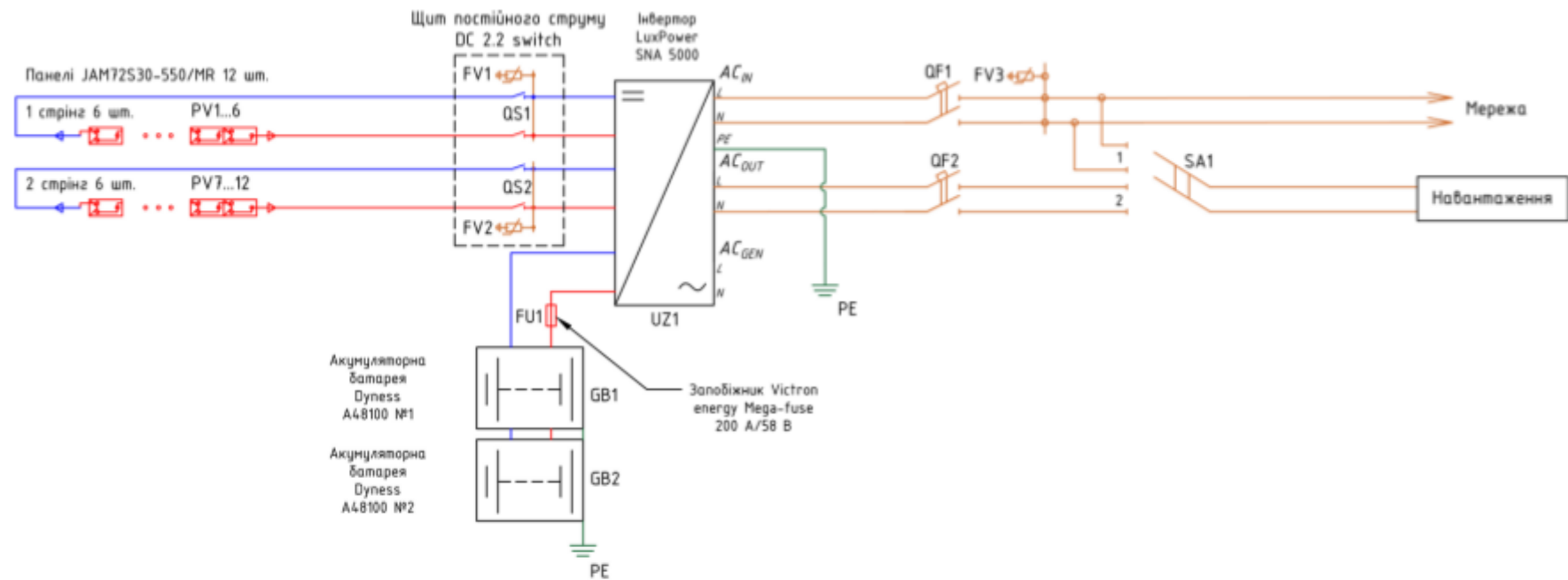


Рисунок 3.2 – Схема приєднань електричного обладнання системи

Висновок до розділу 3

У цьому розділі проведено комплексний розрахунок підсистеми акумулювання електричної та теплової енергії для житлового приміщення з метою забезпечення безперебійного електропостачання та раціонального використання виробленої сонячними енергетичними системами енергії. Основна увага була приділена підбору акумуляторних батарей та теплоакумулятора з урахуванням специфіки споживання, тривалості автономної роботи та безпеки експлуатації.

Для забезпечення резервного електропостачання житлового приміщення протягом двох діб були обрані два акумулятори Dyness A48100 загальною ємністю 9,6 кВт·год. Розрахунок показав, що їх ємності достатньо для покриття потреб усіх споживачів у випадку тимчасового відключення від мережі. Обрана конфігурація забезпечує надійне та безпечне резервне живлення, що є критичним для житлових об'єктів, де перебої з електропостачанням можуть негативно впливати на комфорт та безпеку мешканців.

Аналіз технічних характеристик батарей Dyness A48100 продемонстрував ряд ключових переваг. По-перше, велика кількість циклів заряд-розряд забезпечує тривалий термін служби підсистеми, що сприяє зменшенню експлуатаційних витрат та підвищенню економічної ефективності системи в цілому. По-друге, високий рівень безпеки експлуатації дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з перегрівом, короткими замиканнями або витокami електроліту, що особливо важливо для використання в житлових приміщеннях. Крім того, батареї Dyness відзначаються стабільністю роботи при змінних режимах навантаження та збереженням працездатності навіть при часткових циклах розряд-заряду, що є додатковою гарантією надійності системи.

Для накопичення теплової енергії, виробленої сонячними колекторами протягом світлового дня, було обрано теплоакумулятор Termico об'ємом 300 л із високоякісною теплоізоляцією. Такий підхід дозволяє використовувати теплову енергію у періоди відсутності сонячного випромінювання, забезпечуючи безперервне постачання гарячої води та опалення. Розрахунки показали, що

обсяг і теплоізоляція накопичувача забезпечують мінімальні теплові втрати протягом доби, що сприяє підвищенню енергетичної ефективності системи та зменшенню витрат на додаткові джерела тепла.

Проведений розрахунок підтверджує, що інтеграція акумуляторної та теплової підсистем є ефективним способом забезпечення автономності та стабільності житлового приміщення. Поєднання електричних батарей для резервного живлення з теплоакумулятором для накопичення теплової енергії дозволяє оптимально використовувати вироблену енергію, зменшити залежність від зовнішніх джерел та забезпечити комфортні умови проживання протягом доби та сезону.

Таким чином, підсистема акумуляування енергії, що включає акумуляторні батареї Dyness A48100 та теплоакумулятор Termico, є технічно обґрунтованою, економічно ефективною та безпечною для житлового приміщення. Вона забезпечує надійне резервне електропостачання, дозволяє ефективно використовувати вироблену сонячними колекторами теплову енергію та сприяє підвищенню загальної автономності та стійкості системи. Реалізація таких рішень демонструє доцільність інтегрованого підходу до проектування енергетичних систем на основі відновлюваних джерел енергії та підтверджує їх потенціал для широкого впровадження в житловому секторі.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КОГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА СОНЯЧНІЙ ОСНОВІ

4.1 Ключова ідея проєкту

У цьому розділі кваліфікаційної роботи досліджується концепція комплексного використання сонячної енергії для забезпечення потреб у гарячому водопостачанні та електропостачанні.

Розглянута система підходить для приватних житлових будинків у будь-якому регіоні України, а також для заміських готелів, баз відпочинку та котеджних комплексів. Для досягнення максимальної продуктивності при встановленні сонячної станції слід враховувати географічну широту місцевості та встановлювати обладнання під оптимальним кутом нахилу.

Головна перевага для користувача полягає у зниженні витрат на електроенергію та гаряче водопостачання, а також у забезпеченні резервного живлення та гарячої води у випадку відключення мережі. Така система дозволяє домогосподарству залишатися більш автономним та незалежним.

У таблиці 4.1 представлено опис ідеї стартап-проєкту, що ілюструє ключові цілі та переваги запропонованої системи:

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Застосування	Вигода для користувача
Комплексне використання сонячної енергії з застосуванням фотоелектричної станції та геліоустановки	Приватні будинки	Зменшення витрат на закупівлю електроенергії з мережі
	Заміські готельні комплекси	Зменшення витрат на гаряче водопостачання
	Бази відпочинку	Енергонезалежність

4.2 Дослідження ринкової конкуренції

Світовий розвиток сонячної енергетики відбувається значно швидшими темпами порівняно з іншими відновлюваними джерелами енергії, і Україна не є винятком, особливо в умовах війни. Після початку повномасштабного вторгнення країна-агресор систематично атакує енергетичну інфраструктуру, що призводить до регулярних перебоїв у електропостачанні та гарячому водопостачанні. Центральна структура української енергомережі робить її вразливою та привабливою ціллю для атак.

Використання сонячних електростанцій та геліосистем дозволяє домогосподарствам стати більш енергонезалежними, оскільки кожен власник створює власну невелику розподілену енергомережу, яку можна масштабувати відповідно до потреб і фінансових можливостей.

Зростання тарифів на електроенергію стимулює користувачів шукати більш економічно вигідні рішення. Це особливо актуально для підприємств, де вартість електроенергії значно перевищує тариф для приватних домогосподарств.

Регулярні відключення гарячого водопостачання під час ремонтних робіт на енергомережі залишають споживачів без необхідного ресурсу. Геліосистеми дозволяють зменшити витрати на нагрів води та уникати перебоїв у гарячому водопостачанні.

В умовах сучасних викликів, попит на сонячні електростанції та геліоустановки зростає, що сприяє розвитку ринку відновлюваної енергії в Україні та формуванню більш розосередженої та стійкої енергосистеми по території країни.

Таблиця 4.2 – Аналіз проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
1	2
Енергонезалежність: самостійне забезпечення в електроенергії та гарячому водопостачанні	Залежність від погоди: система генерує енергію виключно за наявності сонячної енергії
Економія: за рахунок використання енергії сонця і зменшення використання з мережі	Великі капіталовкладення: оскільки станція має акумулятори, то її початкова ціна сильно зростає
Комфорт: зменшення впливу змін централізованої енергомережі на життя	Додаткове місце: під додаткове обладнання (бак-акумулятор, АКБ, інвертор) необхідно додаткове приміщення, оскільки шум інвертора може заважати
Екологічність: використання відновлюваних джерел зменшує кількість викидів CO ₂	Складність утилізації: відсутність технологій переробки та обмеженні можливості вторинної переробки АБ

Недоліки системи можуть бути мінімальними, якщо переваги для домогосподарства або підприємства суттєво переважають над ними.

4.3 Аналіз тарифів, обчислення доцільності проекту

Згідно з постановою Кабінету Міністрів України опублікованою 01.06.2023 року, незалежно від обсягу споживаної електроенергії, тариф для населення складає 2,64 грн/кВт·год з ПДВ. Постанова від 27.12.2023 року передбачає збереження цього тарифу для населення до 30.04.2024 року [29].

Оскільки інвертор LuxPower SNA5000 Wide PV має функцію передачі електроенергії в загальну мережу, для скорочення терміну окупності станції доцільно підключити «зелений» тариф.

Відповідно до постанови НКРЕКП від 29.12.2023 року, для домогосподарств із сонячними станціями потужністю до 30 кВт, що вводяться в

експлуатацію у 2024 році, тариф «зеленого» тарифу з 01.01.2024 по 31.12.2024 року становить 590,24 коп./кВт·год (без ПДВ) [30].

4.4 Витратні обчислення

У таблиці 4.3 наведено загальну вартість обладнання для сонячної електростанції разом із витратами на монтажні роботи. Вона включає ціну фотомодулів, інвертора, акумуляторів, сонячних колекторів, баку-акумулятора та додаткових елементів системи, а також вартість їх встановлення та підключення. Ця інформація дозволяє оцінити повну інвестицію у створення автономної енергетичної системи.

Таблиця 4.3 – Витрати на гібридну сонячну електростанцію

Тип обладнання	Модель	К-сть	Вартість 1 шт., грн	Загальна вартість, грн
Сонячні панелі	JA Solar JAM72S30-550/MR 550 Wp, Mono	12 шт.	6 394	76 728
Гібридний інвертор	LuxPower SNA5000 Wide PV	1 шт.	38 590	38 590
Система кріплень під 6 фотомодулів	StringSetter SS-XL-B 06	2 шт.	6 937	13 874
Кабель	Кабель для сонячних панелей 6 мм	150 м	40	6 000
Кабель заземлення	Силовий мідний провід ПВ-3 нгд 6 (жовто-зелений)	50 м	26,58	1 329
Кабель силовий	Кабель ВВГнг 4х6	25 м	102,01	2 550,25
Щит захисту AC	Щит AC LUX	1 шт.	7 875	7 875
Щит захисту DC	Щит DC 2.2 switch	1 шт.	13 428	13 428
Запобіжник	Victron energy Mega-fuse 200A/58V	1 шт.	1 590	1 590
Тримач плавкого запобіжника	Victron energy Mega-fuse	1 шт.	492	492
Акумуляторні батареї	Dyness A48100	2 шт.	64 845	129 690
Монтажні роботи	Монтаж та запуск станції	1 шт.	29 300	29 300
Разом:				321 446,25

4.5 Визначення термінів окупності запропонованої системи

Виходячи з того, що середньодобове споживання електроенергії складає 5 кВт·год, річне споживання для домогосподарства розраховується за формулою:

$$E_{\text{спож}} = E_{\text{спож.день}} \cdot n_{\text{днів}} = 5 \cdot 365 = 1825 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (4.1)$$

де $E_{\text{спож.день}} = 5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ – середнє значення споживання електроенергії протягом дня; $n_{\text{днів}} = 365 \text{ днів}$ – кількість днів у році.

Отже, річне споживання становить 1825 кВт·год, що значно менше за прогнозований річний виробіток системи у 7092,84 кВт·год. Це означає, що сонячна станція може повністю покрити потреби домогосподарства та залишає надлишок електроенергії, який можна використовувати для заряджання акумуляторів або продавати за «зеленим» тарифом.

Оскільки в літні місяці виробіток електроенергії значно перевищує споживання, виникає надлишок енергії, який не буде використаний безпосередньо в домогосподарстві.

Для визначення цього надлишку можна використати різницю між генерацією та споживанням за місяць:

$$E_{\text{прод}} = E_{\text{вироб}} - E_{\text{спож}} = 7092,84 - 1825 = 5267,84 \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (4.2)$$

де $E_{\text{вироб}} = 7092,84 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ – середнє значення виробленої електроенергії протягом року.

Отже, 709,29 кВт·год електроенергії у червні не буде спожито, і без підключення «зеленого» тарифу ця енергія пропадала б. Використання «зеленого» тарифу дозволяє реалізувати надлишок та отримати додатковий дохід, що прискорює окупність сонячної станції.

Як можна помітити з проведених розрахунків, через те, що більша частина року виробіток електроенергії перевищує потреби споживача, значна частина її може бути реалізована на продаж.

Використовуючи «зелений» тариф для станцій, введених в експлуатацію у 2024 році, який становить 590,24 коп./кВт·год (без ПДВ), річний дохід від продажу надлишкової електроенергії можна визначити за формулою:

$$B_{\text{прод}} = E_{\text{прод}} \cdot C_{\text{ЗТ}} = 5267,84 \cdot 5,9024 = 31092,9 \text{ грн.}, \quad (4.3)$$

де $C_{\text{ЗТ}} = 5,9024 \text{ грн./кВт}\cdot\text{год}$ – ціна на продаж електроенергії по «зеленому» тарифу.

Підставляючи розраховану кількість надлишкової енергії за рік (наприклад, з табл. 2.8) і тариф, отримаємо річний заробіток від продажу електроенергії.

Тоді, враховуючи, що тариф на електроенергію, спожиту з мережі, незалежно від обсягу становить 2,64 грн/кВт·год з ПДВ, можна розрахувати економію коштів завдяки власній генерації.

Формула для розрахунку економії виглядає так:

$$B_{\text{спож}} = E_{\text{спож}} \cdot C_{\text{e/e}} = 1825 \cdot 2,64 = 4818 \text{ грн.}, \quad (4.4)$$

де $C_{\text{e/e}} = 2,64 \text{ грн./кВт}\cdot\text{год}$ – ціна за електричну енергію, яка споживається з центральної електромережі.

Тобто, завдяки власній генерації сім'я може за рік заощадити близько 4,8 тис. грн на електроенергії.

Тоді, на основі отриманих розрахунків, термін окупності сонячної станції можна визначити як співвідношення загальної вартості системи до річного доходу та економії:

$$T_{\text{ЕС}} = \frac{B_{\text{ЕС}}}{B_{\text{спож}} + B_{\text{прод}}} = \frac{321446,25}{4818 + 31092,9} = 8,95 \approx 9 \text{ років}, \quad (4.5)$$

де $B_{\text{ЕС}} = 321446,25 \text{ грн.}$ – вартість сонячної електростанції.

Цей розрахунок дозволяє оцінити, за який період інвестиції в систему повернуться.

Варто зазначити, що наведені результати не враховують можливі майбутні підвищення тарифів на електроенергію для побутових споживачів та зростання цін за «зелений» тариф, що може скоротити термін окупності та зробити інвестицію більш вигідною.

4.6 Визначення економічної доцільності встановлення сонячних колекторів

В табл. 4.4 представлена вартість всього обладнання геліосистеми та монтажних робіт.

Таблиця 4.4 – Витрати на геліосистему

Тип обладнання	Модель	К-сть	Вартість 1 шт., грн	Загальна вартість, грн
Сонячні колектори	АХІОМА energy AX-30HP24	2 шт.	25 690	51 380
Бак-акумулятор	Termico 300 л з утепленням	1 шт.	15 298	15 298
Інші комплектуючі	Насос, розширювальний бак, контролер і т.д.	1 компл.	19 500	19 500
Монтажні роботи	Встановлення та запуск	1 шт.	8 700	8 700
Разом:				94 878

Щорічний виробіток одного сонячного колектора АХІОМА energy AX-30HP24 для місцевості села Грабів становить 3819,82 кВт·год. Оскільки на об'єкті планується встановлення двох колекторів, сумарна річна генерація складе 7639 кВт·год.

Для порівняння візьмемо електронагрів води. За умови, що вартість 1 кВт·год електроенергії для домогосподарств становить 2,64 грн, витрати на нагрівання води протягом року можна обчислити за формулою:

$$B_{нагр} = n \cdot E_K \cdot C_{e/e} = 2 \cdot 3819,82 \cdot 2,64 = 20168,65 \text{ грн.}, \quad (4.6)$$

де $E_K = 3819,82 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ – енергія вироблена сонячним колектором протягом року; $n = 2 \text{ шт.}$ – кількість колекторів.

Таким чином, використання геліосистеми дозволяє значно знизити ці витрати, адже більша частина необхідної енергії для нагрівання води виробляється сонячними колекторами, а її окупність становить:

Тоді окупність геліоустановки становить:

$$T_{ГС} = \frac{B_{ГС}}{B_{нагр}} = \frac{94878}{20168,65} = 4,7 \approx 5 \text{ років,} \quad (4.7)$$

де $B_{ГС} = 94878$ грн. – вартість геліосистеми.

4.7 Економічна доцільність гібридної системи

Окупність сонячної електростанції та геліосистеми можна визначити як співвідношення загальних вкладень у систему до річної економії та доходів, що отримуються від генерації енергії:

$$T = \frac{B_{ЕС} + B_{ГС}}{B_{спож} + B_{прод} + B_{нагр}} = \frac{321446,25 + 94878}{4818 + 31092,9 + 20168,65} = 7,42 \approx 7 \text{ років 6 місяців.} \quad (4.8)$$

Це значення показує, через скільки років інвестиції повністю окупляться без урахування можливого подальшого зростання тарифів на електроенергію чи «зеленого» тарифу.

З аналізу розрахунків видно, що поєднане використання сонячної електростанції та геліосистеми значно скорочує термін окупності інвестицій. При цьому, якщо врахувати можливе зростання тарифів на електроенергію в майбутньому, станція може окупитися ще швидше.

Крім того, така система забезпечує не лише самозабезпечення електроенергією та гарячим водопостачанням, але й відкриває можливість отримання додаткового доходу від продажу надлишкової електроенергії у мережу. Також користувачі можуть скористатися іншими перевагами, передбаченими законодавством для генерації електроенергії, що підключена до загальної мережі.

Загалом, впровадження таких комплексних систем підвищує енергетичну незалежність домогосподарств і ефективність використання відновлюваних джерел енергії.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ В КОМПЛЕКСНІЙ СИСТЕМІ КОГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА СОНЯЧНОМУ ВИПРОМІНЮВАННІ

5.1 Правила безпеки під час монтажу сонячних панелей. Робота на висоті

Монтаж сонячних панелей зазвичай здійснюється на висоті, адже більшість сучасних станцій встановлюються на дахах будівель. Згідно з «Правилами охорони праці під час виконання робіт на висоті (НПАОП 0.00-1.15-07)», перед початком робіт необхідно забезпечити безпечні умови: перевірити міцність, стійкість і наявність захисних огорожень, сходів та монтажних платформ перед виконанням робіт на даху; забезпечити працівників засобами індивідуального захисту та контролювати їх правильне використання; вжити заходів для мінімізації впливу потенційно небезпечних факторів; враховувати погодні умови і не проводити монтаж у разі сильного вітру, слизької або мокрої покрівлі; оцінювати стан здоров'я персоналу, який виконуватиме роботи на висоті [26].

Перед установкою панелей обов'язково проводить оцінку конструкції даху сертифікований інженер або спеціаліст з будівництва. Фотомодулі рекомендується встановлювати лише на дахах з вогнетривким покриттям та достатньою несучою здатністю для витримки ваги обладнання та монтажної бригади під час робіт.

Підняття панелей на дах слід здійснювати за допомогою сходових або маятникових підйомників, автокранів. Переносити панелі вручну сходами заборонено.

Основною небезпекою при монтажі є ураження електричним струмом. Фотомодулі виробляють постійний струм під дією сонячного світла, що може спричинити опіки або навіть летальні наслідки при напрузі понад 30 В. Навіть відключені від системи панелі здатні генерувати енергію, тому під час роботи слід використовувати ізольовані інструменти та гумові рукавички відповідного класу. Вимкнути модуль неможливо звичайним способом — єдиний метод

обмежити генерацію — це перекрити доступ світла до панелі, наприклад, перевернувши її лицьовою стороною вниз.

Необхідно уникати роз'єднання електричних з'єднань під навантаженням, оскільки це може викликати іскріння або ураження струмом. Роз'єми повинні залишатися сухими і справними; забороняється вставляти в них металеві предмети або змінювати конструкцію. У районах з високою запиленістю або вологою рекомендується використовувати захисні гумові кришки.

Варто враховувати, що відбиття сонячного світла від снігу чи водної поверхні збільшує вироблення струму та потужність. Також при зниженні температури зростає напруга та енергопродуктивність панелей.

При пошкодженні модуля необхідно використовувати засоби індивідуального захисту, від'єднати панель та виконувати всі роботи лише сухими інструментами у сухих умовах.

Обов'язковою вимогою є заземлення фотомодулів для запобігання ураженню електричним струмом, пожежам та пошкодженню обладнання під час удару блискавки. Усі панелі підключаються до спільної заземленої шини [27].

5.2 Правила що до подальшої експлуатації системи електроживлення

При нормальній експлуатації фотомодулі не потребують спеціального втручання. Зазвичай вони самоочищуються під дією дощу та вітру. Якщо забруднення накопичуються протягом тривалого часу, необхідне ручне очищення, яке проводиться за наступними правилами: очищення фотомодулів виконувати при відключеній системі (без навантаження); проводити роботи у період низького сонячного освітлення, щоб різниця температур між поверхнею панелі та водою не перевищувала 10°C; використовувати воду з тиском не більше 3 атмосфер, без застосування миючих засобів та абразивних матеріалів.

Під час будь-яких робіт слід дотримуватися таких вимог безпеки: уникати механічного впливу на панель, падіння інструментів або наступання на модулі, щоб запобігти пошкодженню; не використовувати кислотні або лужні миючі

засоби; забороняється роз'єднувати електричні контакти під навантаженням через ризик ураження струмом; не намагатися відновити пошкоджені панелі самостійно, оскільки це може призвести до короткого замикання або пожежі при подальшій експлуатації.

Для підтримки працездатності системи рекомендується проводити технічний огляд 1–2 рази на рік, який включає: перевірку напруги стрінгів; контроль електричних з'єднань між панелями; перевірку заземлення; оцінку цілісності модулів за допомогою тепловізора.

5.3 Техніка безпеки при роботі з інверторами та акумуляторними батареями

Перед встановленням інвертора необхідно впевнитися, що обране приміщення відповідає всім вимогам для його монтажу. Для цього перевіряють: інвертор монтується виключно на твердій поверхні; забороняється встановлювати на легкозаймисті матеріали; дотримання мінімальних відступів від інших предметів для забезпечення циркуляції повітря та ефективного розсіювання тепла (значення відступів зазначаються в інструкції до обладнання); монтаж здійснюється у вентильованому приміщенні в межах допустимого температурного діапазону; розміщення інвертора здійснюється вище водопровідних систем та подалі від газопроводів для уникнення попадання вологи та потенційного короткого замикання; інвертор встановлюється вертикально [21].

Для безпеки та коректної роботи по стороні акумуляторів встановлюють запобіжник. Він обмежує надструми та при перевищенні номінального значення струму плавиться, розмикаючи коло. При цьому підбирають кабель та наконечники відповідно до номінального струму заряду та розряду. Запобіжник монтується при відключених АКБ у спеціальному пластиковому корпусі для уникнення випадкового дотику або короткого замикання.

По стороні фотомодулів встановлюють щит захисту постійного струму, який складається з пристрою захисту від імпульсних перенапруг (ПЗіП) та

вимикача постійного струму.

ПЗіП захищає обладнання від імпульсних підвищень напруги при ударах блискавки та аваріях в електричних мережах. Він підключається до «плюсу», «мінусу» та заземлення; при зростанні напруги опір ПЗіП наближається до нуля і імпульс відводиться на землю. Підбирається відповідно до вхідної напруги.

Вимикач постійного струму дозволяє безпечно комутувати стрінг DC під навантаженням. Один вимикач встановлюється на один стрінг та підбирається за параметрами струму та напруги. Він забезпечує безпечне відключення стрінга для технічного огляду або усунення пошкодження. Комутація виконується із застосуванням ізольованих інструментів або гумових рукавичок відповідного класу, або в період низького сонячного освітлення.

По стороні змінного струму встановлюється щит, який складається з: автоматичного вимикача; ПЗіП; трипозиційного перемикача; нульової шини та шини заземлення.

Автоматичний вимикач захищає від короткого замикання та перенавантаження, реагуючи електромагнітним механізмом на скачки струму та біметалічною пластиною на тривале перевищення номіналу. Дугогасильна камера забезпечує швидке розмикання контактів. Вимикач підбирається за номінальним струмом споживача, при необхідності – найближчий більший номінал.

ПЗіП по стороні змінного струму підключається до фази, нуля та заземлення і відводить імпульс на землю при перевищенні напруги.

Трипозиційний перемикач призначений для вибору джерела живлення споживача:

- 0 – живлення відсутнє;
- 1 – живлення від інвертора;
- 2 – живлення від мережі.

Переключення виконується лише при відключеному навантаженні. Перемикач підбирається за номінальним струмом.

Шини забезпечують безпечне підключення великої кількості провідників,

а інвертор обов'язково заземлюється.

Всі роботи з підключення виконуються при відключеній подачі електроенергії з мережі.

5.4 Правила безпеки щодо коректного монтажу акумуляторних батарей. Їх умови зберігання

Приміщення, в якому планується встановлення акумуляторних батарей, має відповідати наступним параметрам: відносна вологість повітря не повинна перевищувати 85 % RH; підстава для розміщення акумуляторів має бути рівною та плоскою; поблизу місця встановлення не повинно бути легкозаймистих або вибухонебезпечних матеріалів; оптимальна температура навколишнього середовища становить 15 °C – 30 °C; уникати впливу пилу, бруду, прямого сонячного випромінювання та вітру.

Рекомендації при встановленні акумуляторних батарей: використовувати засоби індивідуального захисту: ізоляційні рукавички, захисні окуляри, захисне взуття; перед використанням переконатися у належному заземленні пристрою;

перевіряти сумісність обладнання; правильно підключати дроти, не змінюючи полярність; для уникнення короткого замикання не з'єднувати позитивний та негативний полюси безпосередньо; перевіряти надійність контактів, щоб уникнути іскріння; уникати механічних пошкоджень акумулятора, особливо ударів та проколів; повністю відключати живлення при підключенні або демонтажі батареї; розташовувати акумулятори подалі від водопровідних та газопровідних систем; у разі пожежі використовувати сухий порошковий вогнегасник, оскільки рідкий може створити ризик вибуху; забороняється самовільно розбирати будь-які компоненти акумуляторної батареї.

5.5 Інформація що до правильного використання інверторів та акумуляторних батарей

Технічний огляд системи рекомендується проводити 1–2 рази на рік. Під час огляду виконуються наступні дії: перевірка стану заземлення; огляд інвертора на наявність забруднень та очищення за потреби; перевірка стану контактів, їх зтягнутості та цілісності; перевірка ізоляції дротів та тестування на наявність витоків енергії.

Під час експлуатації станції необхідно дотримуватися таких правил: перемикання трипозиційного вимикача здійснюється тільки при відключеному навантаженні; забороняється торкатися контактів та проникати в середину увімкненого обладнання; під час відключення системи послідовність дій повинна бути такою:

- вимкнути споживачі у щитку;
- перевести трипозиційний перемикач на живлення від мережі;
- вимкнути автоматичний вимикач, що відключає інвертор від мережі;
- відключити подачу постійного струму;
- вимкнути інвертор;
- відключити акумулятори;
- перед виконанням будь-яких робіт обов'язково переконатися у повному знеструмленні системи.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У даній кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження та визначено параметри інтегрованої системи тепло- та електрозабезпечення житлового приміщення на основі використання відновлюваних джерел енергії, зокрема дахової сонячної електростанції та сонячних колекторів. Основною метою дослідження було розроблення системи, здатної знизити споживання традиційних енергоресурсів, забезпечити автономність домогосподарства та резервування енергії у випадку тимчасового відключення централізованого електропостачання.

Проведений аналіз кліматичних умов обраного регіону дозволив визначити оптимальні параметри розташування та експлуатації компонентів системи. Було враховано річну інсоляцію, сезонні коливання сонячної радіації та кут нахилу даху, що становить 45° та вважається оптимальним для даного регіону. Такі умови забезпечують максимальне використання потенціалу сонячних модулів і колекторів протягом року, що є критично важливим для забезпечення стабільної генерації електроенергії та тепла.

Для задоволення потреб у гарячій воді було проведено детальний розрахунок необхідної кількості сонячних колекторів AXIOMA energy AX-30HP24. Враховуючи середньодобове споживання гарячої води на одну людину, що становить 2–4 кВт·год, та сезонні коливання сонячної інсоляції, було обрано два колектори замість одного з виробітком 10,46 кВт·год. Такий вибір забезпечує достатню потужність для покриття теплових потреб сім'ї упродовж усього року та дозволяє оптимізувати роботу системи навіть у періоди обмеженого сонячного випромінювання. Наявність двох колекторів підвищує надійність системи, забезпечуючи резервне джерело тепла у разі непередбачених відхилень кліматичних умов.

Для забезпечення стабільного електропостачання домогосподарства обрано гібридний інвертор LuxPower SNA5000 потужністю 5 кВт та встановлено фотомодулі JA Solar JAM72S30-550/MR загальною потужністю 6600 Вт. Така конфігурація дозволяє не лише задовольнити середньодобове споживання

електроенергії в розмірі 5 кВт·год на день, але й забезпечити ефективну генерацію у несприятливих погодних умовах. Аналіз сезонної генерації показав, що вироблена енергія в літній період перевищує зимову приблизно в 4,5 рази, що дозволяє реалізовувати надлишкову електроенергію у мережу за «зеленим» тарифом. Це забезпечує додаткову економічну вигоду та підвищує рентабельність інвестицій у сонячну електростанцію.

Для забезпечення автономності домогосподарства у разі відключення централізованого електропостачання було розроблено підсистему акумулювання електричної та теплової енергії. Розрахункова ємність акумуляторних батарей становить 9,41 кВт·год, що забезпечує резервне живлення протягом двох діб. В якості накопичувачів було обрано два акумулятори Dyness A48100 загальною ємністю 9,6 кВт·год. Вони характеризуються високою кількістю циклів заряду-розряду та підвищеним рівнем безпеки експлуатації, що робить їх придатними для використання у житлових приміщеннях.

Для накопичення теплової енергії, що виробляється сонячними колекторами протягом світлового дня, було підібрано теплоакумулятор Termico об'ємом 300 л із теплоізоляцією. Така конструкція дозволяє використовувати теплову енергію у періоди відсутності сонячного випромінювання, забезпечуючи безперебійне гаряче водопостачання та підтримку комфортної температури в домогосподарстві. Обсяг та теплоізоляція накопичувача забезпечують мінімальні теплові втрати протягом доби та максимальне використання виробленої енергії.

Підсумком дослідження стало створення стартап-проєкту, що передбачає інтегроване використання сонячних електричних та теплових систем. Розрахунок терміну окупності показав, що встановлення геліосистеми досягає економічної ефективності через 5 років, сонячної електростанції — через 9 років, а комбінованої системи — через 7 років та 6 місяців. Це свідчить про доцільність інтеграції обох компонентів для підвищення загальної ефективності та швидшого повернення інвестицій.

У процесі проєктування було розроблено комплекс правил охорони праці, що забезпечує захист персоналу від падіння з висоти, ураження електричним

струмом та інших небезпек під час монтажу та обслуговування обладнання. Такий підхід гарантує дотримання стандартів безпеки та забезпечує тривалий термін служби обладнання без аварійних ситуацій.

Реалізація запропонованого проєкту дозволяє досягти кількох ключових цілей. По-перше, забезпечується енергетична незалежність домогосподарства від централізованих джерел електропостачання. По-друге, підвищується комфорт проживання завдяки стабільному гарячому водопостачанню та електропостачанню. По-третє, суттєво зменшуються витрати на закупівлю електроенергії та теплової енергії. По-четверте, надлишок виробленої електроенергії може бути реалізований за «зеленим» тарифом, що забезпечує додатковий прибуток та підвищує економічну привабливість проєкту.

Таким чином, розроблена комплексна система тепло- та електрозабезпечення на основі сонячних колекторів та дахової сонячної електростанції є технічно обґрунтованою, економічно ефективною та екологічно доцільною. Інтеграція компонентів дозволяє досягти високої автономності та стабільності роботи домогосподарства, підвищує ефективність використання відновлюваних джерел енергії та забезпечує значну економію традиційних енергоресурсів. Отримані результати можуть слугувати основою для масштабування системи, впровадження подібних рішень у інших регіонах та розробки нових проєктів у сфері відновлюваної енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Comparing Different PV Module Types and Brands Under Working Conditions in the United Kingdom / Mohamad Kharseh, Holger Wallbaum. Reliability and Ecological Aspects of Photovoltaic Modules, 2020 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intechopen.com/chapters/67623>.
2. Solar PV still dominates renewable energy capacity additions / IAE, 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>.
3. Solar Collectors / GreenMatch [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.greenmatch.co.uk/solar-energy/solar-thermal/solar-collectors>.
4. Comprehensive Guide to Solar Panel Types / Aurora Solar [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aurorasolar.com/blog/solar-panel-types-guide/>
5. Types of PV Modules: Part A / Jyoshna, Jr., 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.linkedin.com/pulse/types-pv-modules-part-insolare-energy-pvt-ltd->.
6. Different Types Of Solar Panels (2022): Cost, Efficiency & Power / Solar Square, 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solarsquare.in/blog/types-of-solar-panels/>.
7. Introduction to 17 Types of PV Modules, Their Categorization, Uniqueness and Similarities, Construction, Components, Area of Use and Comparative Analysis / Hafiz Shahzad Ahmad Mukhtar, 2023 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.linkedin.com/pulse/introduction-17-types-pv-modules-their-categorization-use-mukhtar>.
8. Different Types Of Solar Collectors: A Detailed Guide / Solar Square, 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solarsquare.in/blog/types-of-solar-collectors/>.
9. Конспект лекцій з дисципліни “Основи електропостачання ” (скорочений курс лекцій, частина 1) для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня освіти денної та заочної форми навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Микола ВУСАТИЙ,

Павло ПОТАПСЬКИЙ, Ігор ГАРАСИМЧУК (За загальною редакцією Павла ПОТАПСЬКОГО). – Кам'янець – Подільський: ЗВО «ПДУ», 2023. – 127с.

10. Types of solar collectors / Boris M [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://solarpanel.today/types-of-solar-collectors/>.

11. Evacuated tubular or classical flat plate solar collectors / Z. Pluta, 2011 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evacuated-tubular-or-classical-flat-plate-solar-Pluta/eabc60c5b1002b3ab61ee1272ca31a09f111f3a1>.

12. Solar collector / Energy Education [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_collector#:~:text=Line%20Focus%20Collectors&text=These%20collectors%2C%20sometimes%20known%20as,connected%20into%20a%20long%20trough.

13. Everything You Need To Know About Solar Batteries / Chauncey Crail, Corinne Tynan, 2023 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.forbes.com/home-improvement/solar/what-is-a-solar-battery/#solar_battery_types_section.

14. What are the different types of solar batteries? / Catherine Lane, 2023 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solarreviews.com/blog/types-of-solar-batteries>.

15. Google Maps [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.google.com.ua/maps>.

16. Рівненська область та Хмельницька область [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://geomap.com.ua/uk-gr/507.html>.

17. Статистика погоди. Кліматичні дані за роками та місяцями / Метеопост [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://meteopost.com/weather/climate/>.

18. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM / European Commission [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.

19. Вакуумний сонячний колектор АХІОМА energy АХ-30НР24

- [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://soncedim.com.ua/product/vakuumnii-soniachnii-kolektor-axioma-energy-ax-30hp24>.
20. JAM72S30 MR / JA Solar [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.jasolar.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=405&fenlei=2&page=2>.
21. SNA 3-6к. User Manual / LuxPower [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://luxpowertek.com/download>.
22. Літій-залізо-фосфатні батареї проти літій-іонних – що взяти краще? / Energy, 2023 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://energyua.com.ua/lifepo4/?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIgJHd4YekgwMVSJyDBx0t-wgCEAAAYASAAEgIV6fD_BwE.
23. Dyness A48100 / Dyness [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dyness.com/products/a48100-1>.
24. Встановлені НОРМИ СПОЖИВАННЯ Води для Населення України (2024) / Повірка Лічильників [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kyiv.poverka.net.ua/normy-spozhyvannya-vody-ukrayina/?amp>.
25. Теплоаккумулятор Termico 300 л з утеплювачем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vodolex.com.ua/ua/catalog/teploakkumulyator-termico-300-1?gclid=Cj0KCQIAhc-sBhCEARIsAOVwHuT64WismMLPcKJh29OVDobAOEPbrWpB0jxuyyDJISbcTrsdZzZ2kGkaAlA7EALw_wcB.
26. Про затвердження Правил охорони праці під час виконання робіт на висоті (НПАОП 0.00-1.15-07) / Верховна Рада України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0573-07#Text>.
27. JA Solar Modules Installation Manual-Single-glass Modules / JA Solar [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.jasolar.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=70&page=1>.
28. A48100 Unit User Manual / International Energy Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ienergy->

[us.com/uploads/files/A48100%C2%A0User%C2%A0Manual.pdf](https://www.us.com/uploads/files/A48100%C2%A0User%C2%A0Manual.pdf).

29. Тарифи для населення / Yasno [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://yasno.com.ua/b2c-tariffs>.

30. Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств / НКРЕКП [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vstanovlennya-zelenih-tarifiv-na-elektrichnu-energiyu-viroblenu-generuyuchimi-ustanovkami-7>.

31. Правила улаштування електроустановок : [арх. 15 березня 2020] / Міненерговугілля України. — Київ : [б. в.], 2017. — 617 с.

32. Основи безпечної експлуатації електроустановок: Підручник / С. В. Панченко, О. І. Акімов, М. М. Бабаєв та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. – 149 с.

33. Методичні рекомендації щодо виконання та оформлення кваліфікаційної роботи магістра / П.В.ПОТАПСЬКИЙ, Л.М.МИХАЙЛОВА, І.Д.ГАРАСИМЧУК, В.М.ДУБІК, О.В.КОЗАК, О.В.ДУМАНСЬКИЙ, А.В.ПЕЧЕНЮК, Ю.І.ПАНЦИР. (За загальною редакцією П.В.ПОТАПСЬКОГО) – ЗВО «ПДУ», 2025. – 38 с.

34. Система дистанційного навчання Moodle 2.7. – «ЗВО «ПДУ»». Режим доступу: <http://pdatu.net.ua/>. – Назва з екрана.

35. Електробезпека: Підручник / С. В. Панченко, О. І. Акімов, М. М. Бабаєв та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – 295 с.

ДОДАТКИ