

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.311.1:621.311.243

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Каплун В.В./
(підпис)

_____ /Антипов
Є.О./
(підпис)

« ____ » _____ 2025 р.

« ____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження електричних параметрів мережевої схеми сонячної електростанції потужністю 150 кВт»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми: Освітньо-наукова програма
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

_____ (науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Кривоносов В.Є.
(ПБ)

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

_____ (науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Петренко А.В.
(ПБ)

Виконав

_____ (підпис)

Декер І.П.
(ПБ)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
к.т.н. доцент _____ Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Декер Ілля Павлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «Дослідження електричних параметрів мережевої схеми сонячної електростанції потужністю 150 кВт» затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 26.09.2024 р. № 1665 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 15.05.2025

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: План, місцерозташування, нормативні документи, каталоги, генеральний план місцевості, обладнання.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Обґрунтування необхідності дослідження електричних параметрів сонячних електростанцій
2. Аналіз методики дослідження параметрів сонячної електростанції
3. Параметризація системи для моделювання мережевої СЕС потужністю 150 кВт
4. Технологічні рішення з інсталяції сонячної електростанції потужністю 150 кВт
5. Моделювання параметрів функціонування мережевої сонячної електростанції
6. Охорона праці

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання «26» вересня 2024 р.

Керівник магістерської роботи _____
(підпис)

Петренко А.В.
(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис)

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота присвячена дослідженню електричних параметрів мережевої сонячної електростанції (СЕС) потужністю 150 кВт з урахуванням кліматичних умов та особливостей проектування і експлуатації.

Об'єктом дослідження є мережева сонячна електростанція середньої потужності.

Предметом дослідження є електричні параметри сонячної електростанції, їх залежність від конструктивних рішень, конфігурації обладнання та зовнішніх кліматичних чинників.

Метою роботи є аналіз впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на ефективність функціонування мережевої сонячної електростанції, проведення комп'ютерного моделювання її роботи та розробка практичних рекомендацій щодо підвищення продуктивності шляхом оптимізації конфігурації системи та впровадження технічних засобів.

У процесі дослідження розглянуто принципи побудови та функціонування СЕС, проведено технічне обґрунтування вибору фотомодулів і інверторів, здійснено розрахунок втрат потужності та параметризацію системи у середовищі PVsyst. Особливу увагу приділено дослідженню впливу температури, вологості, пилових відкладень та вітрового охолодження на вихідну потужність. Проведено аналіз ефективності впровадження методів активного та пасивного охолодження панелей.

Результати моделювання та економічного аналізу підтвердили доцільність застосування пасивного охолодження як найбільш енергоефективного та економічно обґрунтованого рішення. Отримані висновки можуть бути використані для проектування нових сонячних електростанцій, модернізації наявних систем, а також у навчальних цілях при підготовці фахівців у галузі відновлюваної енергетики.

Ключові слова: сонячна електростанція, мережа, інвертор, сонячні панелі, PVsyst, енергетика, моделювання, ефективність, моніторинг, охорона праці.

ABSTRACT

The thesis is devoted to the study of the electrical parameters of a 150 kW grid-connected solar power plant (PV system), taking into account climatic conditions as well as design and operational features.

The object of the research is a medium-capacity grid-connected solar power plant.

The subject of the research is the electrical parameters of the solar power plant, their dependence on design solutions, equipment configuration, and external climatic factors.

The purpose of the work is to analyze the impact of external and internal factors on the efficiency of a grid-connected solar power plant, conduct computer modeling of its operation, and develop practical recommendations for increasing productivity by optimizing the system configuration and introducing technical solutions.

During the research, the principles of construction and operation of PV systems were studied. A technical justification for the choice of photovoltaic modules and inverters was provided. Power losses were calculated, and the system was parameterized using the PVsyst software. Special attention was given to the influence of temperature, humidity, dust deposition, and wind cooling on output power. An analysis was conducted on the effectiveness of implementing active and passive panel cooling methods.

The results of the simulation and economic analysis confirmed the feasibility of using passive cooling as the most energy-efficient and economically justified solution. The conclusions obtained can be used for the design of new solar power plants, the modernization of existing systems, as well as for educational purposes in the training of specialists in the field of renewable energy.

Keywords: solar power plant, grid, inverter, solar panels, PVsyst, energy, modeling, efficiency, monitoring, occupational safety.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	10
1.1.Обґрунтування важливості дослідження в умовах зростаючого інтересу до відновлювальної енергетики.	10
1.2.Формулювання мети та завдань дослідження.	11
1.3.Визначення об'єкта і предмета дослідження.	12
1.4.Опис використаних методів.	15
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	17
2.1.Основи сонячної енергетики та принципи роботи сонячних електростанцій.....	17
2.2.Технологічні рішення у сфері фотогальваніки.	19
2.3.Аналіз попередніх досліджень електричних параметрів.	21
РОЗДІЛ 3. ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ СЕС ПОТУЖНІСТЮ 150 КВТ.....	29
3.1.Розрахунок необхідної кількості та параметрів сонячних панелей.....	29
3.2.Вибір інверторного обладнання та системи захисту.....	32
3.3.Вибір допоміжного обладнання та аналіз втрат у системі.....	37
РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ З ІНСТАЛЯЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ПОТУЖНІСТЮ 150 КВТ.....	43
4.1.Вимоги до проектування та установки.....	43
4.2.Вплив конструктивних рішень на електричні параметри СЕС.....	45
4.3.Особливості встановлення системи моніторингу та управління.....	47

РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	51
5.1.Моделювання електричних параметрів мережевої СЕС.....	51
5.2.Дослідження впливу зовнішніх чинників на електричні параметри.....	56
5.3.Дослідження економічної доцільності використання методів покращення ефективності сонячних панелей	61
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	65
6.1.Нормативні вимоги щодо охорони праці під час експлуатації сонячних електростанцій.....	65
6.2.Заходи безпеки при монтажі та управлінні обладнанням.....	68
6.3.Аналіз ризиків та пропозиції щодо їх мінімізації.....	70
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ	–	відновлювані джерела електроенергії
СЕС	–	Сонячна електростанція
ЗІЗ	–	засоби індивідуального захисту
DC	–	постійний струм
AC	–	змінний струм
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
PV	–	фотоелектричний

ВСТУП

Відновлювана енергетика швидко заповнила простір у світі сучасних технологій та концепцій. Причиною стала велика кількість факторів, які ставлять в пріоритет перехід з генерації енергії шляхом використання видобувних ресурсів на користь генерації з використанням ВДЕ, до яких відносяться сонячні, вітрові, біологічні та інші ресурси

В проблематику генерації від входить використання вичерпних природних ресурсів нашої планети, транспортування електроенергії, і, виходячи з цього колосальні втрати в мережі. Ці проблеми лише відкривають список, який можна продовжувати довго.

Перевагами ж джерел живлення можна вважати можливість забезпечення електроенергією об'єктів локально, без транспортування електроенергії на віддалені ділянки, використання ВДЕ, це є важливим для екологічної складової.

Сонячна генерація вважається одною з надважливих складових для процесу модернізації енергосистем всього світу у зв'язку з тим, що вона пропонує низку переваг, які сприяють сталого розвитку та енергетичної безпеки. Сонячна енергія є невичерпним джерелом, що дозволяє мінімізувати залежність від викопних палив і зменшити викиди парникових газів. По-друге, сонячні електростанції можуть бути встановлені як у великих масштабах, так і на рівні окремих домогосподарств, забезпечуючи децентралізоване виробництво електроенергії. Це підвищує енергетичну незалежність і стійкість енергосистем до зовнішніх впливів. По-третє, технології сонячної енергетики постійно розвиваються, призводячи до зниження вартості виробництва електроенергії та підвищення ефективності сонячних панелей.

Зростаюча світова зацікавленість у ВДЕ, зокрема сонячній, створила потужний імпульс для наукових досліджень та інновацій у цій галузі. Сонячні електростанції (СЕС), перетворюючи сонячне світло на електричну енергію, стали невід'ємною частиною сучасного енергетичного ландшафту. Однак, для ефективного використання потенціалу необхідні глибокі знання про роботу СЕС та вплив різних

факторів на їхню продуктивність. Саме тому дослідження параметрів СЕС набуває особливої актуальності.

Глибоке розуміння параметрів СЕС відкриває широкі можливості для оптимізації їхньої роботи. Вивчаючи електричні характеристики, метеорологічні умови, технічні особливості та економічні аспекти функціонування СЕС, можна визначити оптимальні режими роботи, підвищити ефективність виробництва електроенергії та знизити експлуатаційні витрати. Крім того, дослідження параметрів допомагає створювати точні прогнози виробництва електроенергії, що є важливим для планування енергосистеми та забезпечення її стабільної роботи.

Актуальність дослідження параметрів СЕС обумовлена також необхідністю розробки нових технологій та матеріалів для сонячних панелей. Шляхом вивчення впливу різних факторів на ефективність панелей можна розробити більш досконалі конструкції та матеріали, що дозволять підвищити їхню продуктивність та довговічність.

Дослідження параметрів СЕС є багатогранним та перспективним напрямком наукових досліджень. Воно має не тільки теоретичне значення, але й значний практичний потенціал. Результати досліджень можуть бути використані для розробки ефективних стратегій розвитку сонячної енергетики, оптимізації роботи існуючих СЕС та створення нових технологій.

Вибір теми дослідження параметрів СЕС є актуальним напрямом дослідження, оскільки вона відповідає сучасним трендам розвитку енергетики та має значний потенціал для внеску в розвиток ВДЕ. Глибоке розуміння цієї теми дозволить Вам не тільки отримати нові знання, але й зробити свій внесок у вирішення глобальних проблем енергетики та екології.

РОЗДІЛ 1

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**1.1. Обґрунтування важливості дослідження в умовах зростаючого інтересу до відновлюваної енергетики**

У світі спостерігається зростаючий інтерес до використання ВДЕ, що робить необхідним проведення ретельних наукових досліджень у цій галузі. Сонячна енергетика виділяється як один з найбільш перспективних напрямків, який потребує особливої уваги. З огляду на глобальні виклики, такі як зміна клімату та вичерпання викопного палива, розуміння електричних процесів, що відбуваються в сонячних електростанціях, набуває все більшої важливості.

Ефективність роботи цих станцій безпосередньо залежить від розуміння та оптимізації їхніх електричних характеристик. Ретельний аналіз цих аспектів дозволить підвищити обсяги вироблюваної електроенергії та стимулювати розробку нових технологій та матеріалів для сонячних елементів. Отримана інформація дасть можливість точніше прогнозувати виробництво електроенергії, що є критично важливим для інтеграції сонячних електростанцій в енергосистему.

Ще одним важливим аспектом цих досліджень є необхідність підтримки стабільності та надійності електромереж, особливо з урахуванням зростаючої частки ВДЕ. Розуміння електричних процесів, які відбуваються в сонячних електростанціях, сприяє розробці інтелектуальних систем управління та контролю, які допоможуть підтримувати якість вироблюваної електроенергії.

Незважаючи на значні досягнення в галузі фотоелектрики, ефективність перетворення сонячної енергії в електричну залишається відносно низькою. Лише близько 23% сонячної енергії, що потрапляє на панель, перетворюється на корисну роботу. Решта 77% енергії розсіюється у вигляді тепла або не поглинається фотоелементами [3]. Дані цієї статистики свідчать про велику перспективу удосконалення технологій та дослідження параметрів

Від початку активної стадії розвитку сонячної енергетики в 2010 році прогрес в розвитку технологій значно виріс. Зокрема в 2014 році інтерес до інтеграції СЕС в енергетичну систему виріс навіть у пересічних громадян, через зміни в законодавстві [9]. На той момент ефективність сонячних панелей була близько 15% . На 2024 рік ця ефективність сягає 22%, що відчувається як незначне, але якщо взяти дані 2014 року то стрибок в розвитку є досить великим [5].

Дослідження електричних параметрів сонячних електростанцій є важливим і перспективним напрямком наукових досліджень, він може суттєво сприяти розвитку відновлюваної енергетики (оскільки дані, що оприлюднені на момент написання магістерської роботи (далі - роботи) здаються досить незначними) та забезпеченню енергетичної безпеки. Результати досліджень можуть призвести до вдосконалення існуючих технологій, розвантаженню локальних трансформаторних підстанцій, появи нових інновацій та, зрештою, сприяти забезпеченню більш сталої енергетичної системи.

Саме тому ця робота присвячена детальному дослідженню електричних параметрів сонячної електростанції потужністю 150 кВт.

1.2. Формулювання мети та завдань дослідження

Мета дослідження полягає в аналізі факторів, що впливають на ефективність роботи сонячних електростанцій (СЕС) та розробці рекомендацій щодо оптимізації процесу генерації сонячної енергії в умовах мінливого зовнішнього середовища та постійного розвитку технологій.

Дослідження спрямоване на глибоке розуміння взаємозв'язку між електричними характеристиками СЕС, природними факторами (сонячна радіація, температура, вологість) та матеріалами, з яких виготовлені сонячні панелі. Особлива увага буде приділена аналізу впливу різних типів матеріалів, зокрема полікремнію, на техніко-економічні показники СЕС.

Крім того, дослідження охопить аналіз існуючих та потенційних проблем у сфері сонячної енергетики, таких як:

- Аналіз нормативно-правової бази, яка регулює діяльність СЕС, та виявлення економічних стимулів для розвитку цього сектору.
- Аналіз останніх досягнень у галузі сонячної енергетики та оцінка їхнього потенціалу для підвищення ефективності СЕС

На основі проведеного аналізу будуть сформульовані думки щодо оптимізації конструкції та матеріалів сонячних панелей таких як розробка рекомендацій щодо вибору оптимальних матеріалів та конструктивних рішень для підвищення ефективності та довговічності СЕС., вдосконалення систем управління, розробка моделей, що дозволять точно прогнозувати виробництво електроенергії СЕС з урахуванням погодних умов та інших факторів.

Виконання дослідження допоможе ширше розглянути проблематику та дослідити рішення щодо підвищення ефективності сонячних панелей.

1.3. Визначення об'єкта і предмета дослідження

Об'єктом дослідження в даній роботі є СЕС, зокрема її електричні параметри, що впливають на ефективність роботи в умовах різних кліматичних зон. Предметом дослідження виступають характеристики та процеси, що відбуваються у СЕС та використовуються для живлення цивільних об'єктів.

Вибір номінальної потужності 150 кВт обумовлений рядом чинників. По-перше, така потужність є оптимальною для більшості малих і середніх підприємств, які прагнуть зменшити витрати на електроенергію та знизити залежність від традиційних джерел енергії (У зв'язку з останніми подіями - актуальність досить висока).

Ця потужність при підключенні до споживача забезпечує автономність енергозабезпечення при відповідних інвестиціях, водночас не перевищуючи допустимих норм для підключення до загальної електромережі.

Дослідження електричних параметрів СЕС включає аналіз розподілу потужності, ефективності перетворення сонячної енергії в електричну, а також впливу кліматичних умов на роботу системи. Для більш детального розуміння

впливу навколишнього середовища на продуктивність СЕС необхідно розглянути такі кліматичні показники, як температура повітря, кількість сонячних днів, рівень освітленості та інші фактори, які впливають на інтенсивність сонячної радіації. Ці дані можуть бути представлені у формі таблиці, яку потрібно вставити в розділ, присвячений аналізу кліматичних умов. Кількість сонячної радіації, що потрапляє на горизонтальну поверхню наведена на Рис. 1.1.

Важливими параметрами для аналізу є: напруга відбору, струм, коефіцієнти корисної дії, а також показники стабільності роботи системи під навантаженням. Ці електричні параметри дають змогу оцінити не лише ефективність роботи СЕС, але й здатність системи адаптуватися до змінних умов.

Однак для практичного впровадження СЕС 150 кВт необхідно враховувати законодавчі норми та вимоги, які регулюють встановлення та експлуатацію систем в Україні. Саме тому дослідження електричних параметрів різних моделей та їх ефективність у конкретних умовах стає особливо актуальним.

Для ефективного використання сонячної енергії в Україні необхідно враховувати її нерівномірний розподіл по території країни та сезонні коливання. Найбільший потенціал для розвитку сонячної енергетики мають південні регіони. При проектуванні та експлуатації сонячних електростанцій необхідно проводити детальний аналіз сонячної радіації для конкретного регіону та періоду року.

Важливими параметрами для аналізу є: напруга відбору, струм, коефіцієнти корисної дії, а також показники стабільності роботи системи під навантаженням. Ці електричні параметри дають змогу оцінити не лише ефективність роботи СЕС, але й здатність системи адаптуватися до змінних умов.

Однак для практичного впровадження СЕС 150 кВт необхідно враховувати законодавчі норми та вимоги, які регулюють встановлення та експлуатацію систем в Україні. Саме тому дослідження електричних параметрів різних моделей та їх ефективність у конкретних умовах стає особливо актуальним.

Для ефективного використання сонячної енергії в Україні необхідно враховувати її нерівномірний розподіл по території країни та сезонні коливання. Найбільший потенціал для розвитку сонячної енергетики мають південні регіони.

При проектуванні та експлуатації сонячних електростанцій необхідно проводити детальний аналіз сонячної радіації для конкретного регіону та періоду року.

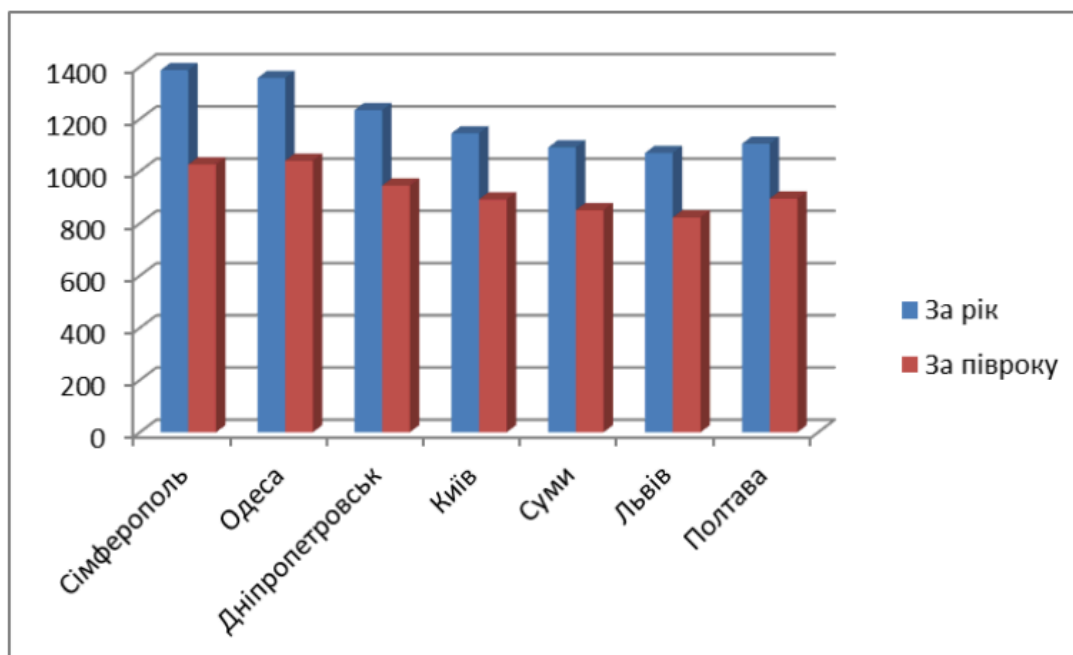


Рис. 1.1. Кількість сонячної радіації, що потрапляє на горизонтальну поверхню

СЕС складається з масиву фотоелектричних модулів та інверторів (для отримання змінного струму промислової частоти). Відповідно до завдання на проектування передбачувана генерована потужність складає 150 кВт.

Науково-технічний супровід проектуваного об'єкту не вимагається.

Основні кліматичні показники відповідають чинним нормативним документам [10-12] будуть враховуватись при дослідженні параметрів СЕС, вказані в Таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Погодні особливості в досліджуваному районі

Поз.	Найменування	Характеристика
1	Товщина стінки ожеледі	19 мм
2	Вітрове навантаження	360 Па
3	Снігове навантаження	1610 Па
4	Середньорічна температура повітря	+8°C
5	Абсолютна мінімальна температура	-29°C
6	Абсолютна максимальна температура	+28°C
7	Річна кількість опадів	642 мм
8	Сейсмічність району	6 балів
9	Нормативна глибина промерзання ґрунту	0.8 м

Розрахунковий облік генерованої потужності та облік власних потреб на стороні 0,4 кВ встановлюється в існуючу ГРШ. Схему функціонування СЕС наведено на Рис. 3.1

1.4. Опис використаних методів

Дослідження параметрів сонячної електростанції є важливим етапом для оцінки її ефективності, виявлення потенційних проблем та оптимізації роботи. Існує широкий спектр методів, які можуть бути використані для досліджень:

1. Прямі вимірювання:

- Вимірювання напруги та струму
- Вимірювання температури
- Вимірювання інсоляції

2. Моніторинг та збір даних.

3. Моделювання та симуляція:

- Моделювання: Використання спеціалізованих програм з метою максимально можливого, точного відтворення роботи досліджуваних об'єктів, наприклад, моделювання в PVsyst

- Симуляція: Використання програмного забезпечення для моделювання роботи СЕС в різних сценаріях. Це допомагає оцінити вплив різних факторів на ефективність системи та розробити стратегії її оптимізації.

4. Аналіз даних. Складається з:

Статистичного аналізу - використання статистичних методів для аналізу зібраних даних дозволяє виявити закономірності, тренди та аномалії.

Зокрема наступні методи буде проведено в дослідженні.

Висновки до першого розділу:

У розділі обґрунтовано актуальність дослідження електричних параметрів СЕС в умовах зростаючого інтересу до відновлюваної енергетики. Підкреслено важливість аналізу факторів, що впливають на ефективність роботи СЕС, зокрема природних умов та матеріалів сонячних панелей.

У ході написання розділу сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, а також описано методи, які будуть використані для досягнення поставлених цілей. Ці аспекти створюють основу для подальшого дослідження та оптимізації роботи сонячних електростанцій.

Додатково визначено основні кліматичні показники та інші данні, важливі для подальшого дослідження

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНОЇ
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**2.1. Основи сонячної енергетики та принципи роботи сонячних електростанцій**

Сонячна енергетика – це перспективний напрямок у розвитку відновлюваної енергетики, який сприяє перетворенню сонячного світла безпосередньо в електричну енергію. Серцем сонячної електростанції є сонячні панелі, що складаються з фотоелементів. Саме фотоелементи, за принципом фотоелектричного ефекту (див. рис. 2.1) , перетворюють сонячну енергію на електричний струм. Цей струм, як правило, є постійним, тому для його використання в побуті та промисловості потрібен інвертор – пристрій, який перетворює постійний струм на змінний.

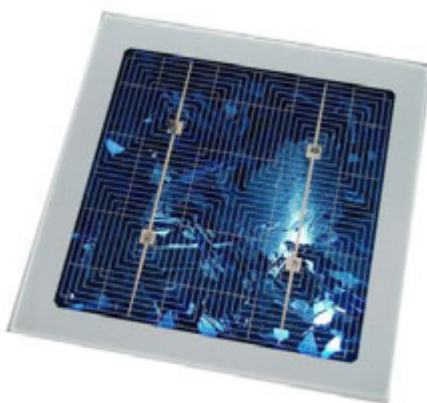


Рис. 2.1. Фотоелемент

Принцип роботи сонячної електростанції та фотомодулів

Мережева сонячна електростанція працює за принципом перетворення сонячної енергії в електричну з подальшим передаванням її в електромережу. Функціональну схему наведено на Рис. 2.2. Основним елементом такої станції є

фотомодулі, які генерують постійний струм, та інвертори, які перетворюють його на змінний, та система захисту й контролю.

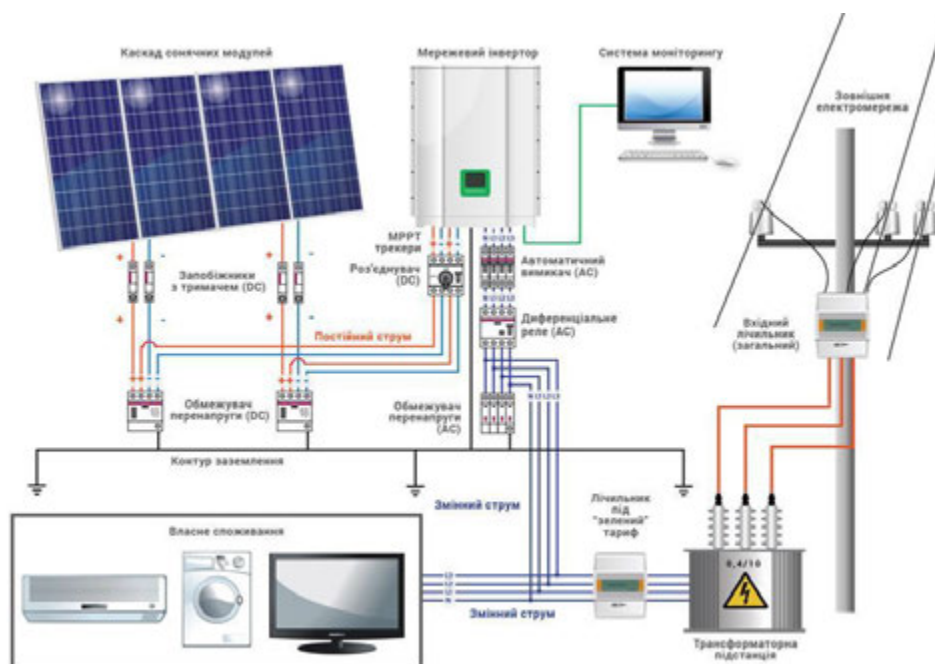


Рис. 2.2. Функціональна схема роботи СЕС

Фотомодулі складаються з фотоелементів, виготовлених із напівпровідникових матеріалів, найчастіше кремнію. Під впливом сонячного світла у фотоелементах виникає електричний струм завдяки фотогальванічному ефекту. Будову фотомодуля можна вказано на Рис. 2.3. Окремі фотоелементи з'єднані між собою у модулі, а модулі об'єднуються у стрінги для досягнення необхідної напруги та потужності.

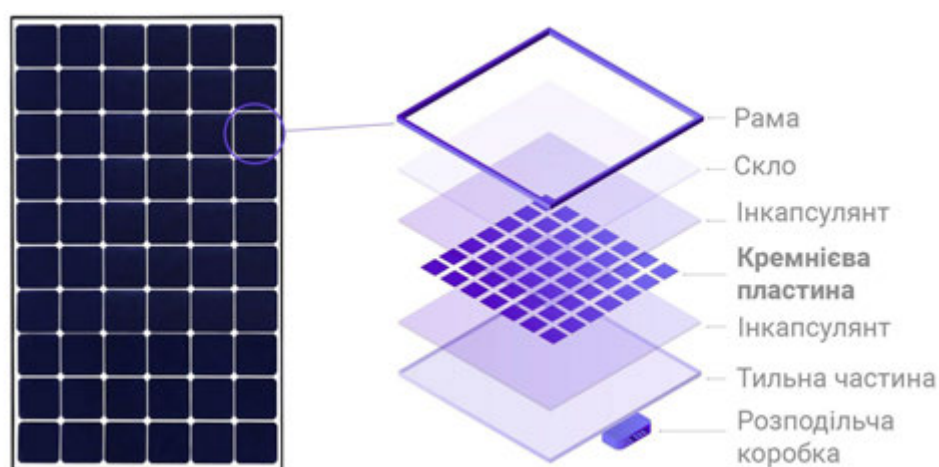


Рис. 2.3. Будова фотомодуля

Згенерований постійний струм подається на інвертор, який перетворює його на змінний з параметрами, що відповідають мережевим стандартам (400 В, 50 Гц). Далі електроенергія використовується на власні потреби або передається в загальну мережу. Робота системи контролюється системою моніторингу, яка відстежує параметри генерації та виявляє можливі відхилення в роботі.

Різні типи сонячних панелей відрізняються за технологією виробництва та ефективністю. Найпоширенішими є монокристалічні та полікристалічні панелі, а також перспективні тонкоплівкові та панелі на основі перовського. Вибір типу панелі залежить від конкретних умов експлуатації та економічних можливостей.

Окрім сонячних панелей та інвертора, до складу сонячної електростанції можуть входити контролери заряду, акумулятори та монтажна система. Контролер заряду регулює процес заряджання акумуляторів і захищає їх від перевантаження. Акумулятори накопичують енергію, вироблену сонячними панелями, для використання в нічний час або при відсутності сонячної радіації. Монтажна система забезпечує надійне кріплення сонячних панелей до даху або землі.

Сонячна енергетика має ряд переваг: невичерпність джерела енергії, відсутність шкідливих викидів, можливість використання в автономних системах електропостачання, зменшення залежності від традиційних джерел енергії та створення нових робочих місць. Однак, існують і певні виклики, такі як висока вартість обладнання, залежність від погодних умов та необхідність великих площ для розміщення сонячних електростанцій.

Незважаючи на ці виклики, сонячна енергетика має великі перспективи. Постійний розвиток технологій призводить до зниження вартості обладнання та підвищення ефективності сонячних панелей. Завдяки цьому сонячна енергетика стає все більш доступною та конкурентоспроможною з традиційними джерелами енергії.

2.2. Технологічні рішення у сфері фотогальваніки

Сонячна енергетика, як один з найперспективніших напрямів у виробництві електроенергії, постійно розвивається. Протягом десятиліть кремній був основним матеріалом для створення сонячних батарей. Його частка на ринку зросла з 15% у 1950-х роках до майже 28% сьогодні [3]. Монокристалічні кремнієві елементи, завдяки своїй однорідній структурі, забезпечують високу ефективність перетворення сонячного світла в електрику.

Однак, постійний пошук більш ефективних та економічно вигідних рішень спонукає дослідників звертатися до нових матеріалів. Особливий інтерес викликають перовскіти. Ці матеріали демонструють надзвичайно високу ефективність перетворення сонячного світла в електрику, перевищуючи показники кремнієвих аналогів. В лабораторних тестах перовскітні сонячні батареї досягли ефективності 29.4%, а в комбінації з кремнієм – навіть 31.3%. Для більших клітин, за допомогою промислових методів, вдалося досягти ефективності 22.5% [5].

Перехід від кремнію до перовскіту є значним кроком вперед. Хоча кремнієві технології, такі як PERC та двосторонні елементи, також постійно вдосконалюються, забезпечуючи довшу службу та кращу продуктивність, перовскіти пропонують нові можливості для підвищення ефективності сонячних батарей.

Існує сильний поштовх до розробки більш ефективних та економічно вигідних сонячних батарей. Перовскітні клітини, завдяки своїй високій ефективності та потенціалу для подальшого вдосконалення, є лідерами в цій галузі. У поєднанні з кремнієм вони можуть досягати ефективності понад 30%.

Тандемні сонячні батареї, що поєднують в собі різні матеріали, такі як кремній і перовскіт, також демонструють значний потенціал. Вони дозволяють ефективніше використовувати сонячне світло різної довжини хвилі і досягати ефективності до 28,1%. Тонкоплівкові кремнієві елементи також розглядаються як економічно ефективне рішення.

Підсумовуючи, сонячна енергетика переживає період бурхливого розвитку. Поява нових матеріалів і технологій, таких як перовскіт і тандемні сонячні батареї, відкриває нові можливості для підвищення ефективності і зниження вартості

сонячної енергії. Це робить сонячну енергетику все більш конкурентоспроможною і сприяє переходу до більш чистої та сталої енергетики.

Сонячна енергетика, як один з найперспективніших напрямків у виробництві електроенергії, постійно розвивається. Одним з ключових напрямків розвитку є вдосконалення технологій виробництва сонячних батарей.

Після технології PERC, яка дозволила значно підвищити ефективність кремнієвих сонячних батарей, наступним кроком стала технологія Topcon. Вона обіцяє ще вищий рівень ефективності – до 28,75%. Науково-дослідний інститут сонячної енергетики ISFH (Німеччина) вже досяг ККД 26,1%, а компанія JinkoSolar у червні 2021 року встановила новий світовий рекорд ефективності для комерційних модулів на рівні 25,25% [6].

Паралельно з розвитком технологій для монокристалічних комірок, активно розвивається напрямок тандемних та гібридних сонячних батарей. Ці батареї складаються з кількох шарів, кожен з яких перетворює певну частину сонячного спектру. Така архітектура сприяє досягненню більш високої загальної ефективності.

Важливим кроком у підвищенні ефективності сонячних батарей стало створення двосторонніх комірок та модулів. Вони здатні виробляти електроенергію не тільки з сонячного світла, що падає на передню поверхню, але й з відбитого світла від землі. Завдяки цьому, їхня ефективність може досягати 27% і більше [5]. Незважаючи на ряд переваг, широкому впровадженню двосторонніх модулів заважають такі фактори, як відсутність єдиних стандартів тестування та маркування.

Одним з різновидів двосторонніх модулів є модулі типу скло-скло. Вони відрізняються високою міцністю та довговічністю, але мають більшу вагу та вартість. Проте, за прогнозами, їхня частка на ринку зросте до 40% протягом найближчих 10 років.

2.3. Аналіз попередніх досліджень електричних параметрів

Вітчизняне дослідження ІНФТУНГ

Одне з останніх досліджень, проведених на практиці проведено дослідницькою групою Університету ІНФТУНГ. Об'єктом дослідження були СЕС «Бородчанська» та СЕС «Радче» [15].

В дослідженні основна увага приділяється показникам енергоефективності інверторів Fronius, схема підключення яких зображена на рис. 2.4. Вони використовуються для перетворення постійного струму, згенерованого сонячними панелями, у змінний струм. Було проведено експериментальні вимірювання по яких отримано наступні результати:

Гармонічні складові струму фази А показали наявність певних спотворень, що вказує на можливий вплив інверторів на якість електроенергії.

Напруга на виході інверторів має чітко синусоїдну форму, що відповідає нормам [16], але струми містять гармонічні складові, які можуть впливати на мережу.

Максимальна енергоефективність інверторів Fronius становила 93,5%. Цей показник змінювався залежно від напруги, яка подавалася на інвертор (оптимальний рівень – 280 В).

Інвертори демонструють кращу ефективність за умов модульного підключення окремих секцій, уникаючи перевантажень.

Частота змінного струму знаходилася в межах допустимих значень (49,6-50,2 Гц). Це свідчить про стабільність роботи інверторів в нормальних умовах.

У дослідженні [15] використовувався апаратно-програмний комплекс ІВАПК, який дозволяє проводити аналіз параметрів електроенергії в реальному часі.

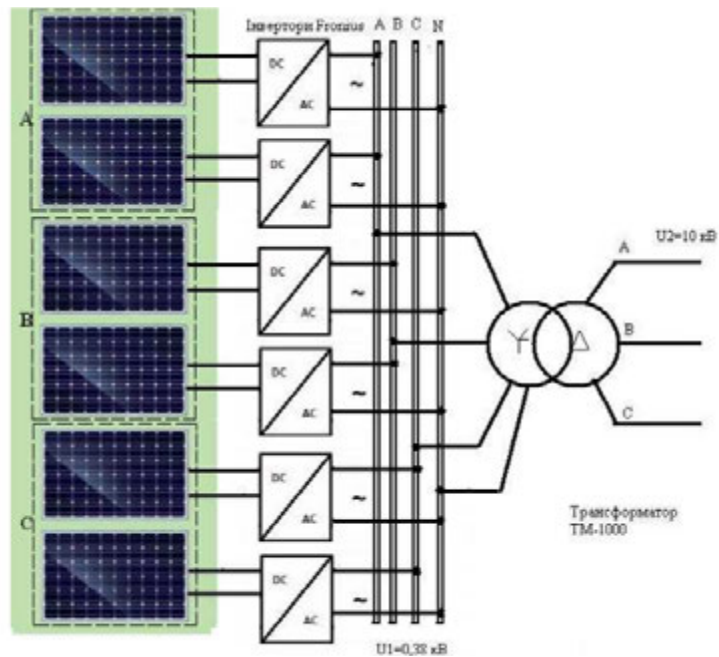


Рис. 2.4. Принципова схема підключення інверторів Fronius

В ході дослідження отримано кілька цікавих результатів:

Реактивна потужність на затискачах трансформаторної підстанції була мінімальною, однак спотворення через вищі гармоніки струму було помітним. Динаміку цих змін вказано на Рис. 2.5. Це викликало потребу у використанні спеціальних фільтрів гармонік для забезпечення якості енергії.

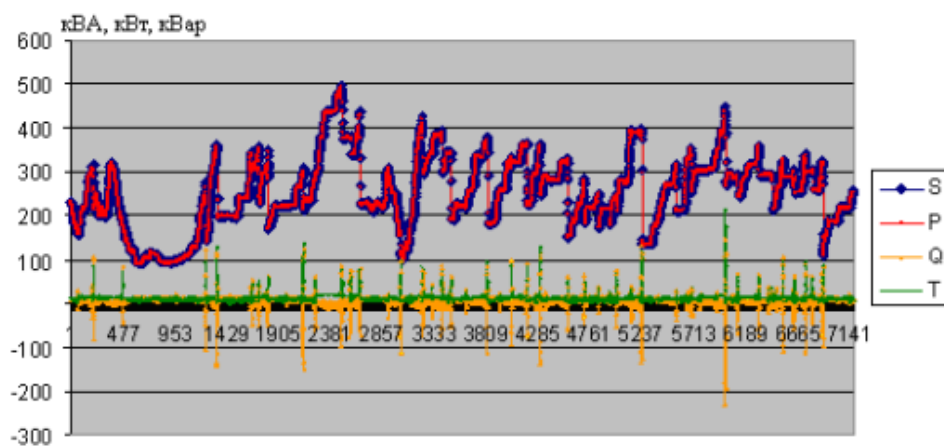


Рис. 2.5. Динаміка зміни активної та реактивної потужностей на затискачах ТП СЕС

Реактивна потужність мала від'ємний характер, з піками, що були синхронними зі спотвореннями струму.

Закордонна робота [34] дослідників Автономного університету Керетаро:

Автори провели систематичний огляд 113 статей (2018–2025) за методикою PRISMA, щоб класифікувати та кількісно оцінити зовнішні чинники, які впливають на ефективність СЕС. Основні категорії факторів: технологічні, екологічні, дизайн і монтаж, експлуатаційні. У результаті визначено інтервали втрат потужності для кожного фактора (наприклад, 0–20 % через змінність інсоляції, 5–25 % через підвищення температури тощо) .

У виконаному авторами систематичному огляді для ідентифікації та оцінки досліджень з ефективності СЕС застосовано PRISMA-протокол, який передбачає чітку послідовність етапів пошуку, відбору та аналізу публікацій. Спочатку в базі Scopus здійснено первинний пошук за ключовими словами “solar photovoltaic systems” у поєднанні з термінами «dust», «shadows», «operating temperature», «orientation» та іншими, що стосуються зовнішніх чинників (Identification phase: n = 1052 статті) . Далі, на основі обмежень за роками публікацій (2018–2025), типом документів (виключено огляди, конференційні матеріали, книги) та предметними областями (відкинуто дослідження з AI, економіки, оптимізації та інших невідповідних тем), кількість статей скоротилася до 736 (Screening phase) . Після детального аналізу анотованих даних за критеріями релевантності та якості (використання PRISMA-чеклісту: визначені критерії включення/виключення, оцінка ризику упередження) до остаточного переліку увійшло 113 публікацій (Eligibility and Inclusion phases) . Для кожної з відобраних робіт екстраговано інформацію про зовнішні чинники (інсоляція, температура, забруднення, кліматичні умови, геометрія установки) та кількісні показники втрат потужності, що дозволило провести кількісний синтез результатів і побудувати узагальнені діапазони втрат для кожного фактора. Цей строгий підхід гарантує репрезентативність і відтворюваність висновків огляду, оскільки всі кроки протоколу задокументовано за стандартами PRISMA.

У хронологічно упорядкованому порівнянні виокремлено п'ять ключових зовнішніх чинників, що визначають втрати потужності СЕС у польових умовах: інсоляція, температура, забруднення (soiling), кліматичні умови (вологість, вітер, хмарність) та геометрія установки (нахил, орієнтація, затінення). Інсоляція

безпосередньо корелює із струмом короткого замикання: коливання від 0 до 20 % втрат обумовлені змінами потоку фотонів, тоді як напруга залишається майже сталою.

Підвищення температури навколишнього середовища призводить до погіршення електричних характеристик модулів: кожен градус вище стандартних 25 °C знижує вихідну потужність на 0.3–0.5 %, в сукупності даючи від 5 до 25 % втрат у спекотних регіонах . Накопичення пилу й бруду зменшує прозорість захисного покриття, викликаючи втрати продуктивності в межах 2–30 % залежно від частоти очищення й локальних запиленних умов . Вологість, туман і сильний вітер спричиняють додаткові оптичні й теплові втрати (5–15 % через оптичне розсіювання вологи й 1–5 % через порушення охолодження), а щільна хмарність може знизити інсоляцію до 40 % . Нарешті, відхилення кута нахилу та азимуту від оптимальних значень призводять до втрат у 3–15 %, тоді як локальне затінення через будівлі чи рослинність може зменшити потужність до 25 % через нерівномірний розподіл струму по модулях . Найбільш ефективним підходом до мінімізації втрат потужності через зовнішні чинники є комплексне поєднання оптимального проектування, активного теплового менеджменту, регулярного очищення, адаптивного моніторингу та закладення “страхового” резерву потужності. Перш за все, при проектуванні СЕС треба точно врахувати локальний рівень інсоляції та сезонні коливання освітленості, вибираючи оптимальний кут нахилу й азимут панелей, а в умовах високої нестабільності сонячного випромінювання - застосовувати одновісні або двовісні треки для максимального захоплення прямих променів

Далі, для зниження негативного впливу перегріву модулів необхідно передбачити пасивні заходи охолодження - вентилявані монтажні конструкції та світловідбивні покриття - і, за потреби, використовувати фазочутливі матеріали (PCM) або водяне обмивання, що дозволяють утримувати температуру поверхні в межах 25–35 °C та зменшують втрати потужності до 5 %

Очищення панелей має здійснюватися регулярно - не рідше ніж раз на місяць у високозапиленних регіонах - із застосуванням сухих або вологих методів, а за

можливості автоматизованих систем і гідрофобних покриттів, що збільшують інтервали між прибираннями і знижують операційні витрати на 20–30 %

Важливо також впровадити систему моніторингу з реєстрацією температури, інсоляції й швидкості вітру, яка у режимі реального часу коригуватиме точки максимальної потужності (MPPT) інверторів й оперативно сигналізуватиме про відхилення від номінальних умов

Нарешті, проєктувальники повинні закладати технічний резерв потужності на рівні 5–15 % від розрахункової, аби компенсувати невраховані втрати через зміну зовнішніх чинників протягом терміну експлуатації СЕС, яка забезпечує підтримку заданих показників виробітку за будь-яких кліматичних коливань. Нижче в таблиці 2.1.-2.3. буде наведено цікаві данні з дослідження.

Фактори, що впливають на ефективність фотоелектричних систем

Змінні, що цікавлять	Відсоток/діапазон збитків
Тип сонячного випромінювання	0–20%
Температура навколишнього середовища	5–25%
Робоча температура	3–20%
Бруд і забруднення	2–30%
Погода	5–40%
Кут нахилу	5–15%
Орієнтація	3–15%
Затінення	5–25%
Конфігурація фотоелектричної панелі	2–10%

Таблиця 2.2.

Аналіз нових технологій сонячних модулів

Технології	Опис	Переваги	Застосування
Двосторонні сонячні елементи (PERC)	Передова технологія генерує електроенергію як з прямих сонячних променів, так і з відбитих сонячних променів у задній частині елемента.	Вища ефективність завдяки захопленню світла як з передньої, так і з задньої частини комірки.	Використовується в місцях з високим відбиттям світла, оптимізація простору.
Технологія плаваючих РМ	Встановлення сонячних батарей на великих водоймах для запобігання втратам земель.	Рішення для нестачі наземного простору: дозволяє використовувати водойми для встановлення.	Облаштування озер, водосховищ та інших водойм.
Інтегровані панелі РМ	Сонячні панелі, інтегровані в архітектуру будівлі.	Зменшує розмір сонячних установок, покращує естетику та має менший візуальний вплив.	Житлові, комерційні та громадські будівлі.

Сонячні дерева	Штучні дерева, що перетворюють падаюче сонячне світло на електрику.	Виробництво електроенергії без зайняття великих площ землі, використання міських просторів.	Міські інсталяції, парки та громадські місця.
Агрофотоелектричні	Одночасне використання сільськогосподарських угідь для вирощування сільськогосподарських культур та встановлення сонячних панелей.	Максимізує доступний простір; генерує енергію без шкоди для сільськогосподарського виробництва.	Сільськогосподарські зони, розвиток сільських районів.

Таблиця 2.3.

Переваги та недоліки матеріалів, що використовуються для виробництва фотоелектричних елементів

Матеріал	Ефективність (%)	Перевага	Недоліки
Монокристалічний кремній	20–26	Довговічність	Висока вартість
Полікристалічний кремній	15–20	Економічний	Нижча ефективність
Аморфний кремній	6–10	Гнучкий, легкий	Нижча ефективність
GaAs	>30	Відмінна продуктивність	Високі витрати
CdTe	15–18	Економічний	Токсичність
CIGS	>20	Гнучкий	Помірні витрати
Пероскіт	>25	Низька вартість	Токсичність
Органічні матеріали	10–15	Гнучкий	Низька ефективність

Висновки до другого розділу:

У розділі виконано ґрунтовний аналіз методики дослідження параметрів сонячної електростанції. В ході дослідження розглянуто базові принципи фотоелектричного перетворення та функціонування мережевих СЕС: від

фотоелементів і фотомодулів до інверторів і систем накопичення, з урахуванням особливостей їх монтажу та захисту. Також охарактеризовано новітні технологічні рішення у сфері фотогальваніки - від вдосконалених кремнієвих комірок (PERC, Topcon) до перспективних перовськітних і тандемних батарей, що відкривають шлях до підвищення ефективності понад 30 %. Проаналізовано результати вітчизняних та закордонних досліджень: вимірювання ККД інверторів Fronius та кореляційний огляд зовнішніх чинників за протоколом PRISMA, для кількісної оцінки втрати потужності від інсоляції, температури, забруднення, кліматичних умов і геометрії установки.

Нарешті, сформовано рекомендації щодо оптимізації експлуатації СЕС через проектні рішення (трикутні трекеери, пасивне охолодження, автоматизоване очищення, моніторинг MPPT) та технічний резерв потужності на рівні 5–15 %, які забезпечують стабільність виробітку в умовах змінних зовнішніх факторів. Цей комплексний підхід закладає методичну основу для подальших емпіричних досліджень електричних параметрів сонячних електростанцій.

РОЗДІЛ 3

ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ СЕС
ПОТУЖНІСТЮ 150 КВТ**3.1. Розрахунок необхідної кількості та параметрів сонячних панелей**

При проектуванні мережевої сонячної електростанції (СЕС) важливо правильно визначити кількість фотомодулів, їх тип та параметри. Вибір панелей безпосередньо впливає на продуктивність станції, рівень втрат енергії та економічну ефективність.

На ринку представлені різні типи сонячних модулів, серед яких найпоширенішими є:

- Монокристалічні – мають високий ККД (до 22%) та довший термін служби, проте коштують дорожче.
- Полікристалічні – дешевші, проте поступаються монокристалічним за ефективністю (ККД до 18%).
- Тонкоплівкові – використовуються рідко через низький ККД, але можуть бути ефективними в умовах розсіяного освітлення.

Для станції обрано монокристалічні панелі, оскільки вони забезпечують максимальну продуктивність за мінімальної займаної площі.

Таблиця 3.1.

Основні технічні характеристики JAM78S30-590/MR, “JA Solar”

Параметр	Величина	
	STC	NOCT
<i>Електричні параметри</i>		
Максимальна потужність, Вт	590	446
Напруга максимальної потужності, В	44.8	42.94
Струм максимальної потужності, А	13.17	10.48
Ефективність модуля STC, %	21	
Максимальна напруга збірки, В	1000/1500DC	
<i>Температурні характеристики</i>		
Температурний коефіцієнт для потужності, %/С	-0,35	
Температурний коефіцієнт для напруги холостого ходу, %/С	-0,275	
Температурний коефіцієнт для струму короткого замикання,	0,045	
<i>Механічні параметри</i>		
Діапазон робочих температур, °С	-40...+85	
Номінальна робоча температура модуля (NMOT), К	45±2	
Габаритні розміри, мм	2465x1134x35	
Маса, кг	31.1	

Розрахунок необхідної кількості панелей:

Основний параметр для розрахунку – загальна встановлена потужність станції. Для нашої СЕС необхідно досягти 150 кВт. Потужність одного стандартного сонячного модуля (наприклад, JA Solar JAM78S30-590/MR) складає 590 Вт.

Кількість панелей визначається за формулою (3.1):

$$N = \frac{P_{\text{сес}}}{P_{\text{панелі}}} \quad (3.1)$$

де, $P_{\text{сес}}$ – загальна потужність станції, кВт,

$P_{\text{панелі}}$ – потужність однієї панелі, Вт.

Підставимо значення:

$$N = \frac{150000}{590} \approx 255 \text{ панелей}$$

Таким чином, для забезпечення потужності 150 кВт потрібно встановити 255 панелей.

Однак, для забезпечення стабільної генерації протягом тривалого періоду та компенсації можливих втрат (забруднення, нагрівання, деградація модулів), прийнято рішення збільшити кількість панелей до 336 шт.

Згідно з цим рішенням розрахунки дещо змінюються.

Загальна встановлена потужність фотоелектричних модулів, згідно рівняння:

$$P_{DC} = 336 * 590 = 198240 \text{Вт} = 198,24 \text{кВт} \quad (3.2)$$

Оптимальний розподіл панелей між інверторами здійснено у пропорції 112 панелей на 50-кВт інвертор та 224 панелі на 100-кВт інвертор.

Сонячні панелі можна з'єднувати *послідовно, паралельно або комбіновано*. У мережевих СЕС зазвичай використовується стрінгова схема, коли певна кількість панелей об'єднується в один ланцюг (стрінг), а стрінги підключаються до інвертора. Попередньо прийнято що максимальна пропускна спроможність напруги на інвертор складатиме 1100В.

Розрахунок максимальної кількості панелей у стрінгу, згідно рівняння:

$$N_{\text{стрінг}} = \frac{1100}{41,9} \approx 26 \quad (3.3)$$

Приймаємо 14 панелей у стрінгу для безпечного функціонування СЕС.

Загальна кількість стрінгів, згідно рівняння:

$$N_{\text{стрінг}} = \frac{336}{14} \approx 24 \quad (3.4)$$

Отже, станція буде складатися з 24 стрінгів по 14 панелей у кожному

Розподіл між інверторами:

Інвертор потужністю 100 кВт: 16 стрінгів по 14 панелей (224 панелі, 132,16 кВт DC).

Інвертор потужністю 50 кВт: 8 стрінгів по 14 панелей (112 панелей, 66,08 кВт DC).

Перевірка співвідношення DC/AC:

- Для інвертора потужністю 100 кВт:

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{132}{100} \approx 1.32 \quad (3.5)$$

- Для інвертора потужністю 50 кВт :

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{66,08}{50} \approx 1.32 \quad (3.6)$$

Таким чином, коефіцієнти DC/AC для обох інверторів дорівнюють 1,32, і відповідає допустимому діапазону (1,1–1,4). Це дозволяє максимально ефективно використовувати інверторне обладнання та мінімізувати втрати генерації.

У характеристиках більшості інверторів вказано, що вони можуть працювати із завищеним DC/AC Ratio.

При виборі інверторного обладнання буде враховано цю важливу деталь.

3.2. Вибір та розрахунок інверторного обладнання та системи захисту

При проектуванні мережевої сонячної електростанції (СЕС) важливим етапом є вибір інверторного обладнання. Інвертори виконують ключову функцію – перетворюють постійний струм, який виробляється сонячними панелями, у змінний струм, який подається в електромережу. Вибір інвертора залежить від загальної потужності станції, робочої напруги стрінгів та вимог до ефективності перетворення.

У дослідженні передбачається установка інверторів, в які закладено функції поглинання реактивної складової та протидії підвищенню напруги в точці підключення, а також функція генерування реактивної складової, для боротьби з провалами напруги.

Розрахунок інверторного обладнання:

Для мережевої сонячної електростанції обране інверторне обладнання повинно складатись з двох інверторів.

Розрахунок відповідності інверторів загальній потужності СЕС базується на співвідношенні загальної потужності фотомодулів до інверторної потужності (DC/AC ratio).

1. Перевірка відповідності інверторів:

Загальна потужність інверторів (AC), згідно рівняння:

$$P_{\text{інв}} = 100 + 50 = 150 \text{ кВт} \quad (3.7)$$

Співвідношення DC/AC визначаємо згідно рівняння:

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{198}{150} \approx 1.32 \quad (3.8)$$

Оптимальне значення DC/AC для мережевих СЕС зазвичай знаходиться в діапазоні 1,0 – 1,4. Отримане значення 1,32 свідчить про те, що інвертори підібрані оптимально і зможуть ефективно працювати без значних перевантажень або недовантажень.

2. Розподіл панелей між інверторами:

Отже для рівномірного розподілу панелей між інверторами використовуються:

- Інвертор на 100 кВт – 170 панелей (100,3 кВт);
- Інвертор на 50 кВт – 86 панелей (50,7 кВт).

3. Перевірка вхідної напруги інверторів:

Максимальна напруга для кожного інвертора: 1100 В;

Робоча напруга одного фотомодуля (MPPT): 41,9 В.

В підсумку, у кожному інверторі формується 16 та 8 стрінгів по 14 модулів, що відповідає їхнім технічним характеристикам.

Вибір інверторного обладнання:

Для мережевої СЕС обрано два інвертори виробництва Huawei, рисунки яких наведено нижче:

- SUN2000-100KTL-M1 на Рис. 3.2.
- SUN2000-50KTL-M3 на Рис. 3.1.



Рис. 3.1. Вигляд інверторів а) SUN2000-50KTL-M3, та б) SUN2000-100KTL-M1

Технічні характеристики даних інверторів описано в Таблицях 3.1. - 3.2.

Таблиця 3.2.

Основні технічні характеристики SUN2000-100KTL-M1 (потужністю 100 кВт)

Параметр	Значення
Ефективність, %	98,5
Вхідні параметри	
Максимальна напруга, В	1 100
Максимальна потужність, Вт	110 000
Діапазон робочої напруги MPPT	200 - 1000
Кількість входів постійного струму на один MPPT контроллер	2/10
Кількість MPPT контролерів	10
Вихідні параметри	
Номінальна активна потужність,	50 000
Номінальна напруга, В	400/230 або 480/280
Максимальний струм, А	144,4/120,3
Частота мережі, Гц	50/60
Механічні параметри	
Габаритні розміри, Д x Ш x В, мм	1035x700x365
Маса, кг	90
Рівень захисту по ГОСТ 14254-2015	IP66

Таблиця 3.3.

**Основні технічні характеристики SUN2000-50KTL-M3
(потужністю 50 кВт)**

Параметр	Значення
Ефективність, %	98,5
Вхідні параметри	
Максимальна напруга, В	1 100
Максимальна потужність, Вт	55 000
Діапазон робочої напруги MPPT	200 - 1000
Кількість входів постійного струму на один MPPT контроллер	2/8
Кількість MPPT контролерів	1
Вихідні параметри	
Номінальна активна потужність,	50 000
Номінальна напруга, В	400/230 або 480/280
Максимальний струм, А	79.8/66.5
Частота мережі, Гц	50/60
Механічні параметри	
Габаритні розміри, Д x Ш x В, мм	640x530x270
Маса, кг	49
Рівень захисту по ГОСТ 14254-2015	IP66

Таке рішення дозволяє рівномірно розподілити навантаження між пристроями та забезпечити стабільну роботу станції.

Також враховано допустимий коефіцієнт перевантаження інверторного обладнання:

Huawei SUN2000-100KTL-M1 – максимальна вхідна потужність 150 кВт,

Huawei SUN2000-50KTL-M3 – максимальна вхідна потужність 75 кВт

Реальна встановлена потужність:

На 100 кВт інвертор подається 132,16 кВт (88,1% від максимально допустимого значення), на 50 кВт інвертор подається 66,08 кВт (88,1% від максимально допустимого значення).

Отже, обидва інвертори працюють у межах своїх технічних можливостей, і перенапруги чи перевантаження не буде.

Також інвертори Huawei є керованими мережею.

Виконується програмування інверторів з функцією зміни режимів роботи в залежності від рівня генерації та напруги на клеммах (згідно з керівництвом по експлуатації інвертора), а саме:

- Підтримка постійного коефіцієнта потужності, з підтримкою допустимих режимів роботи зовнішньої мережі (за умови, підтримки робочого діапазону регулювання);

- Підтримка на виході інверторів постійної реактивної потужності;

- Зворотній контроль рівня напруги відносно параметрів зовнішньої мережі;

- Динамічний контроль уставок інверторів стосовно коефіцієнта потужності або рівня реактивної потужності, відносно параметрів мережі.

Обґрунтування вибору:

Висока ефективність перетворення – обидва інвертори мають ККД понад 98,7%, мінімізуючи втрати енергії. [13-14]

Гнучкість у підключенні – велика кількість МРРТ-трекерів дозволяє оптимально розподіляти навантаження між панелями та уникати втрат через нерівномірне освітлення.

Надійність – наявність вбудованого захисту від перенапруг і короткого замикання підвищує безпеку роботи станції.

Зручність у керуванні – підтримка системи моніторингу SmartLogger від Huawei сприяє віддаленому контролю стану інверторів.

Для забезпечення безперебійної роботи станції необхідно передбачити захист обладнання від перевантажень, короткого замикання, перенапруги та грозових розрядів.

Захист від перенапруги:

Перенапруга може виникати через грозові розряди або коливання напруги в електромережі. Для її обмеження встановлюються:

-Обмежувачі перенапруги (ОПН) типу II на стороні постійного та змінного струму.

-Захисне заземлення для ефективного відведення струму блискавки.

Захист від короткого замикання та перевантажень:

Для запобігання перегріву проводів та пошкодження обладнання використовуються:

-Автоматичні вимикачі на стороні змінного струму, які спрацьовують у разі перевищення допустимого струму.

-Запобіжники на стороні постійного струму для захисту фотомодулів від коротких замикань.

Захист від зворотного струму:

При з'єднанні декількох стрінгів може виникати зворотний струм, що призводить до перегріву панелей. Для його обмеження встановлюються діодні розв'язки між стрінгами.

Блискавкозахист:

Оскільки сонячні панелі розташовані на відкритому просторі, існує ризик ураження блискавкою. Тому передбачено:

-Блискавкоприймачі з металевими стрижнями, підключені до системи заземлення.

-Контур заземлення з опором не більше 10 Ом.

Отже в СЕС, мережеві параметри якої ми будемо досліджувати входять:

- інверторе обладнання одиничною потужністю 50 кВт (1 шт.);

- інверторе обладнання одиничною потужністю 100 кВт (1 шт.);

- фотоелектричні модулі одиничною потужністю 590 Вт (JA Solar, 336 шт.) .

3.3. Вибір допоміжного обладнання та аналіз втрат у системі

Окрім основних компонентів мережевої СЕС - фотомодулів та інверторів, ключову роль у забезпеченні стабільної та безпечної роботи системи відіграє допоміжне обладнання. Його правильний підбір дозволяє знизити втрати електроенергії, забезпечити ефективний захист усіх вузлів та стабільне функціонування впродовж усього терміну експлуатації.

Вибір кабельної продукції:

Між панелями та інверторами використовується кабель постійного струму типу ПВ-1-Ф з перерізом 4 мм², розрахований на напругу до 1500 В. Загальна довжина цих ліній становитиме близько 320 метрів. Для обчислення втрат потужності застосовано формулу:

$$\Delta P = I^2 * R \quad (3.9)$$

де, I – розрахунковий струм стрінгу (приблизно 13,5 А для одного стрінгу),

R – опір провідника на 1 км для перерізу 4 мм² \approx 4,61 Ом/км.

Ураховуючи довжину кабельних ліній і кількість стрінгів, сумарні втрати не перевищують 1,3%, що відповідає нормі (допустимі втрати до 1,5%).

З боку змінного струму (вихід інверторів до загального щита) прийнято рішення використати силові кабелі типу ВВГнгд перерізом 3×35+1×16 мм² та 3×70+1×35 мм² відповідно:

Розрахунок падіння напруги для кожного кабелю показав, що втрати в мережі становлять менше 1%, також відповідаючи нормам [16].

Захисно-комутаційна апаратура:

Для надійного захисту інверторів передбачено автоматичний вимикач для захисту на вході до кожного інвертора:

Для інвертора 50кВт:

$$I = \frac{50000}{1100 \cdot 0.98} = 46,4 \text{ А} \quad (3.10)$$

Враховуючи запас отримуємо:

$$I_{\text{запас}} = 46,4 \cdot 1.32 = 61.2 \text{ А} \quad (3.11)$$

- Обираємо АВ номіналом 63А.

Для інвертора 100кВт:

$$I = \frac{100000}{1100 \cdot 0.98} = 92,8 \text{ А} \quad (3.12)$$

Враховуючи запас отримуємо:

$$I_{\text{запас}} = 92,8 \cdot 1.32 = 122.5 \text{ А} \quad (3.13)$$

- Обираємо АВ номіналом 125А.

На виході кожного інвертора, розрахунок проведений згідно наступних рівнянь:

$$I = \frac{50}{0,92 \cdot 3 \cdot 0,38} \approx 82,6 \text{ А} \quad (3.14)$$

- вибрано автомат на 83А.

$$I = \frac{100}{0,92 \cdot 3 \cdot 0,38} \approx 165,3 \text{ А} \quad (3.15)$$

- вибрано автомат на 200А.

Також для загального захисту обрано Автоматичний вимикач ЕТІ EB2S 250/3SF, розрахований на сумарний струм до 250 А, у відповідності з максимальним навантаженням двох інверторів згідно рівняння (3.10):

$$I_{\text{ном}} = \frac{150}{0,92 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,38} = 247,7 \text{ А} \quad (3.16)$$

Крім того, передбачено окремі DC-запобіжники для захисту кожного стрінгу на стороні постійного струму, для унеможливлення локальних коротких замикань в стрінгах та знижує ризик аварій. Принципову електричну схему наведено на Рис. 3.3.

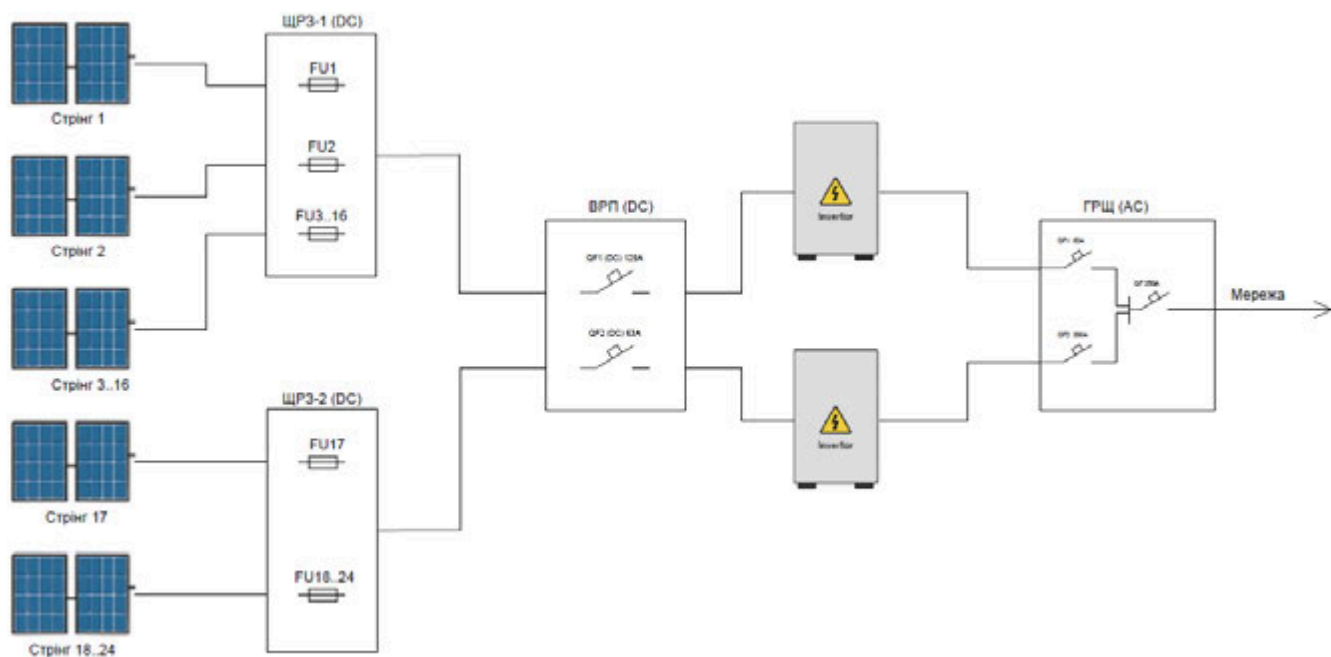


Рис. 3.3 Принципова електрична схема функціонування СЕС

Передбачена система заземлення реалізована у вигляді кільцевого мідного контуру, що відповідає вимогам [17] і забезпечує опір розтікання струму не більше

10 Ом, як того вимагає ПУЕ. Уся металева конструкція та обладнання приєднані до контуру заземлення для виключення ураження електричним струмом.

Система моніторингу та автоматизації:

Система моніторингу фотогальванічної електростанції, схема якої зображена на Рис. 3.3. виконує наступні функції:

- оперативний контроль стану станції;
- підтримка доступу до всіх інверторів;
- контроль та управління системою фотогальванічної станції за допомогою вбудованого WebUI (перегляд в режимі реального часу інформації про електростанцію, пристрої та несправності, налаштування параметрів пристроїв, тощо);
- віддалене налаштування та обслуговування;
- швидке управління потужністю та компенсація реактивної потужності для всіх інверторів, підключених до контролера.

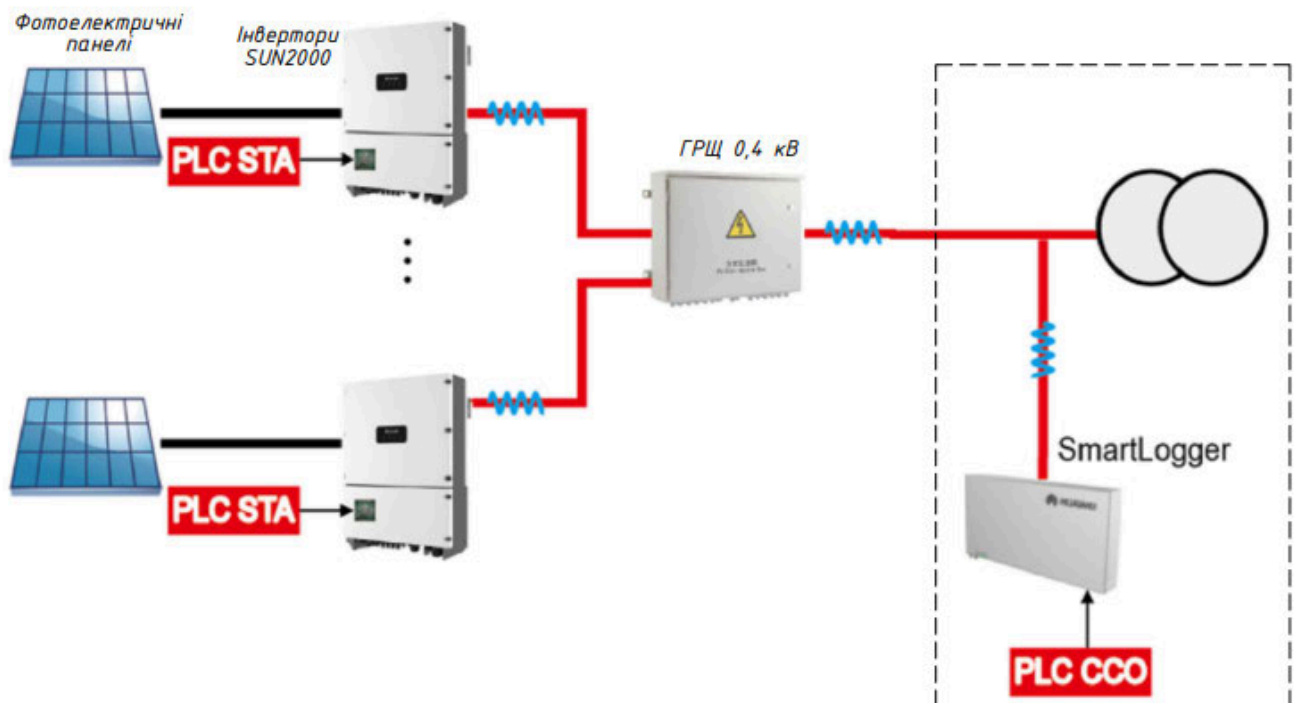


Рис. 3.4. Схема мережевого зв'язку по силовим кабелям

Система моніторингу фотогальванічної електростанції побудована на контролерах вбудованих в інвертори та програмного забезпечення. Для віддаленого моніторингу може використовуватись персональний комп'ютер або ноутбук з встановленим програмним забезпеченням або через WEB браузер.

Для контролю за роботою станції використовується система SmartLogger 3000 від Huawei, яка дає змогу:

- Віддалено контролювати виробіток електроенергії.
- Аналізувати роботу кожного інвертора та виявляти несправності.
- Автоматично реагувати на перевантаження та збої в мережі.
- Система моніторингу працює через протокол Modbus RTU та підтримує підключення до хмарних сервісів.

Висновки до третього розділу:

У розділі проведено параметризацію мережевої сонячної електростанції. Виконано розрахунок кількості фотомодулів, прийнято рішення застосувати монокристалічні панелі JA Solar JAM78S30-590/MR, потужністю 590 Вт і збільшити їх число до 336 шт. для компенсації втрат продуктивності. Визначено оптимальну кількість стрінгів та розподіл між двома інверторами Huawei SUN2000-100KTL-M1. Розподіл вийшов наступним: 8 та 16 стрінгів по 14 панелей в кожному. Співвідношення DC/AC склало 1,32, що лежить у допустимому діапазоні та забезпечує ефективне використання інверторів.

Детально обґрунтовано вибір інверторного обладнання з урахуванням максимальних входових напруг, потужності та можливостей управління реактивною потужністю. Описано систему захисту – від перенапруги (ОПН типу II, заземлення), короткого замикання (автоматичні вимикачі, запобіжники), зворотного струму (діодні розв'язки) і блискавкозахист.

У розділі також здійснено підбір допоміжного обладнання: кабелі постійного (ПВ-1-1 4мм²) та змінного струму (ВВГ 3x35мм² та ВВГ3x70мм²) з розрахунком втрат, автомати на вході до інверторів та на їх виході, DC-запобіжники,

заземлювальний контур , а також описано систему моніторингу з можливістю віддаленого контролю та автоматизації.

Таким чином, розділ закладає технічну основу для моделювання СЕС, забезпечуючи відповідність усіх компонентів потужнісним, електричним і захисним вимогам, що гарантує надійну, безпечну та ефективну роботу системи.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ З ІНСТАЛЯЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ПОТУЖНІСТЮ 150 КВТ

4.1. Вимоги до проектування та установки

Проектування та встановлення сонячної електростанції потребує ретельного дотримання технічних норм, стандартів безпеки та вимог чинного законодавства. Це сприяє забезпеченню ефективної та безпечної експлуатації системи, оптимізувати виробіток електроенергії та мінімізувати можливі ризики.

Нормативно-правова база та стандарти:

При розробці та монтажі СЕС необхідно враховувати наступні нормативні документи:

- ДСТУ EN 62446 – визначає вимоги до проектування, випробування та перевірки фотоелектричних систем.
- ДСТУ ІЕС 60364 – регулює питання електробезпеки при встановленні електроустановок.
- ПУЕ – визначають основні вимоги щодо підключення та захисту електрообладнання.
- ДБН В.2.5-23:2010 – регламентують монтаж зовнішніх та внутрішніх електромереж.
- ISO 9001 – містить вимоги щодо якості виконання робіт та управління ризиками.

Дотримання цих стандартів гарантує відповідність електростанції всім вимогам якості, безпеки та ефективності.

Проектування: технічні вимоги та особливості

Одним із ключових аспектів проектування є правильний вибір місця для встановлення сонячних панелей. Важливо забезпечити максимальний рівень інсоляції, орієнтацію панелей на південь та оптимальний кут нахилу, який у середньому становить **20-35°** для України.

При розрахунку конфігурації станції особлива увага приділяється наступним аспектам:

- Вхідні параметри інверторів – загальна напруга та струм фотоелектричних модулів не повинні перевищувати допустимі значення для обладнання.
- Електричні втрати – вибираються кабелі відповідного перерізу, щоб зменшити втрати енергії під час транспортування.
- Температурний коефіцієнт – з урахуванням зміни напруги панелей під впливом температури довкілля.

Розміщення обладнання також потребує врахування будівельних норм. Для дахової установки важливо перевірити несучу здатність покрівлі, а для наземного варіанту – забезпечити міцне кріплення конструкцій, які витримують снігові та вітрові навантаження згідно з [11].

Інсталяція: електробезпека та підключення до мережі

Монтаж електричних компонентів здійснюється з дотриманням [32] та вимог до персоналу, який має відповідну кваліфікацію (група допуску з електробезпеки не нижче III).

Основні вимоги до електроустановки

- Захист від перевантаження та коротких замикань – встановлення автоматичних вимикачів, зокрема ЕТІ 250А для запобігання аварійним ситуаціям.
- Система заземлення – відповідність нормативам [26], що передбачає опір контуру не більше 10 Ом.
- Захист від перенапруги – використання обмежувачів перенапруги для зменшення впливу грозових розрядів.
- Моніторинг та управління – підключення СЕС до системи контролю (наприклад, Huawei SmartLogger), що дозволяє оперативно аналізувати параметри роботи електростанції.

При підключенні до мережі необхідно отримати дозвіл оператора системи розподілу (ОСР) та виконати налаштування інверторів відповідно до вимог Кодексу систем розподілу НКРЕКП.

Відмінності та особливості проектування:

Особливістю станції 150 кВт є розподіл навантаження між двома інверторами: Huawei SUN2000-100KTL-M1 (100 кВт) та Huawei SUN2000-50KTL-M3 (50 кВт). Важливо правильно збалансувати кількість панелей у стрінгах, щоб уникнути перевищення допустимих потужностей обладнання.

Також слід врахувати температурні коливання, динамічні навантаження та гібридне використання енергії.

4.2. Вплив конструктивних рішень на електричні параметри СЕС

Орієнтація панелей (азимут -20°)

Азимут сонячних панелей визначає напрямок, в якому вони спрямовані відносно півночі. Встановлення СЕС з азимутом -20° означає, що панелі будуть нахилені на 20° на захід від півночі, що може вплинути на кількість сонячної енергії, яку вони отримують протягом дня.

Цей тип орієнтації може бути оптимальним для регіонів, де сонце переважно знаходиться на заході у післяобідній час. Залежно від географічного положення, такий азимут може забезпечити кращі результати в умовах пізнього сонячного проміння, і збільшувати сумарну вироблену потужність.

Нахил панелей (20°)

Нахил панелей визначає кут, під яким сонячні панелі орієнтовані відносно горизонту. У даному випадку нахил 20° є помірним. Це може бути оптимальним для регіонів з помірним кліматом, де сонце не знаходиться надто високо в небі. Такий кут дозволяє зберігати баланс між максимальною ефективністю влітку та зимовою продуктивністю. Ілюстрація нахилу та азимуту панелі наведена на Рис. 4.1.

Вплив конструкції монтажу на електричні параметри:

Установлення панелей на даху може обмежувати можливості для вентиляції, що може підвищити температуру панелей, особливо в жаркий період року. Підвищення температури панелей знижує їх ефективність, оскільки температура і

напруга мають обернену залежність (при підвищенні температури зменшується напруга на панелях, і призводить до зниження їх вихідної потужності).

Для цієї установки можна застосувати конструктивні рішення, які покращать вентиляцію (наприклад, за рахунок підйому панелей на певну висоту або використання спеціальних вентиляційних систем). Це допоможе знизити температуру модулів і зберегти стабільну роботу електричних параметрів.

Для детальнішого розуміння впливу цих конструктивних рішень на електричні параметри, буде застосовано комп'ютерне моделювання, яке дозволяє врахувати такі фактори, як інсоляція, температура, орієнтація та нахил панелей.

Моделювання допоможе оцінити, як обрані конструктивні параметри (азимут, нахил, тип монтажу) впливають на вироблену потужність, напругу, струм та ефективність роботи СЕС, а також як ці фактори змінюються протягом року в залежності від погодних умов.

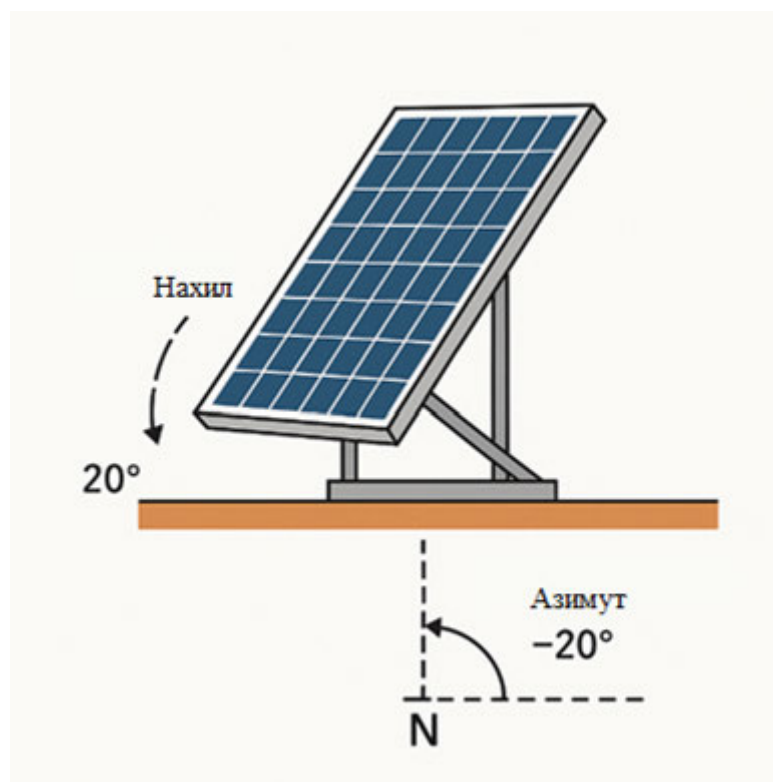


Рис. 4.1. Ілюстрація нахилу та азимуту панелі

4.3. Особливості інсталяції системи моніторингу та управління

Для забезпечення ефективної та безперебійної роботи сонячної електростанції використовується система моніторингу та управління, яка дозволяє відстежувати параметри роботи, аналізувати можливі відхилення та здійснювати оперативне управління обладнанням.

Система моніторингу є важливим компонентом для підвищення ефективності СЕС, оскільки вона дозволяє визначати продуктивність станції у реальному часі, Контролювати роботу фотомодулів, інверторів та допоміжного обладнання, Виявляти збої, несправності та відхилення від нормального режиму роботи, а також оптимізувати роботу станції шляхом аналізу отриманих даних. Схема підключення системи моніторингу наведена на Рис. 4.2.

До структури системи моніторингу входять датчики та вимірювальні прилади, комунікаційне обладнання, програмне забезпечення, сервери зберігання та обробки інформації.

Основне обладнання системи моніторингу та управління:

Для моніторингу роботи станції використовується SmartLogger 3000 від компанії Huawei.

Таблиця 4.1.

Основні характеристики SmartLogger 3000

Параметр	Значення
Підключення до інверторів	До 80 інверторів
Комунікаційний інтерфейс	RS485, Ethernet, 4G
Протокол передачі даних	Modbus RTU/TCP
Живлення	24 В DC або 220 В AC
Максимальна відстань зв'язку	До 1000 м (RS485)
Вбудовані алгоритми аналітики	Так

Функціональні можливості SmartLogger 3000:

- Збір даних з інверторів SUN2000-100KTL-M1 та SUN2000-50KTL-M3.
- Передача даних на сервер Huawei FusionSolar для подальшого аналізу.
- Виявлення відхилень у роботі станції та передача тривожних повідомлень у разі аварійної ситуації.
- Підтримка хмарного моніторингу – доступ до даних через мобільний додаток або веб-інтерфейс, який показано на Рис. 4.3.)

Схема підключення контролера системи моніторингу SmartLogger до мережі 0,4 кВ

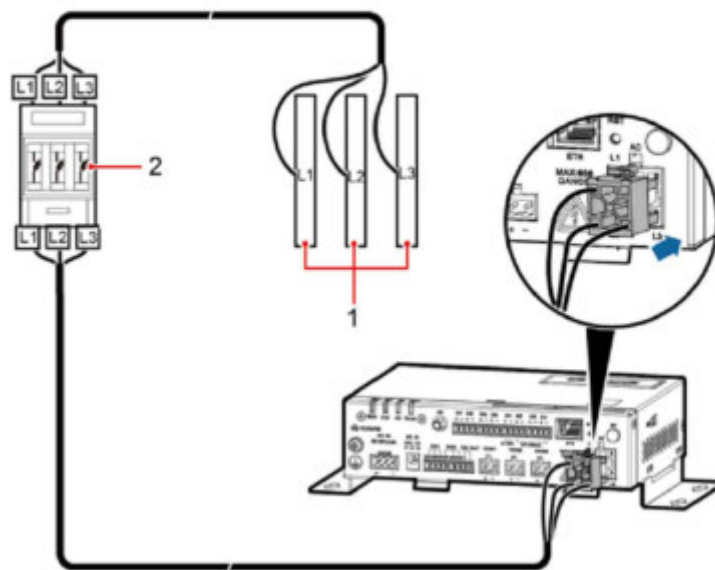


Рис. 4.2. Схема підключення системи моніторингу

В основі приладів для збору даних використовуються інвертори, які постійно фіксують основні робочі параметри - напругу, струм, температуру та загальну продуктивність СЕС. Вся ця інформація автоматично передається до системи моніторингу SmartLogger 3000.

На рівні фотомодулів встановлені датчики температури, освітленості та струму, які дозволяють більш точно оцінювати роботу окремих панелей у реальних умовах. Це особливо актуально при дослідженні впливу зовнішніх чинників, наприклад зміни температури або рівня інсоляції, на вихідні електричні параметри.

Отримані дані передаються за допомогою кабельних інтерфейсів - Ethernet або RS485 - на сервер Huawei FusionSolar. У випадку, якщо система має доступ до Інтернету, ці дані стають доступними для перегляду в режимі реального часу через хмарну платформу. Такий підхід дозволяє не лише оперативно реагувати на зміну параметрів, але й накопичувати історичні дані для подальшого аналізу, моделювання та виявлення закономірностей у роботі станції.

SmartLogger 3000 проводить аналіз ефективності роботи СЕС. У разі відхилення параметрів система автоматично надсилає сповіщення про можливі несправності. Також через веб-інтерфейс можна керувати інверторами та аналізувати історичні дані роботи станції.

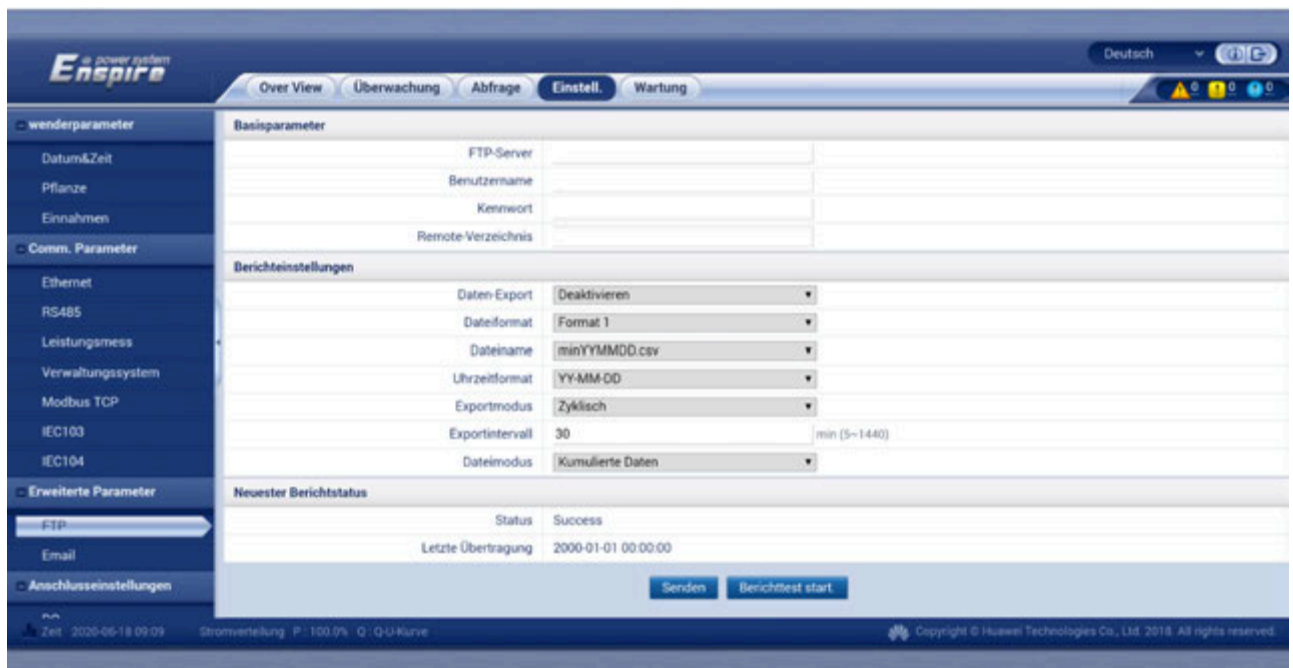


Рис. 4.3. Інтерфейс програми моніторингу

Функціональні можливості та переваги системи моніторингу:

Система моніторингу сонячної електростанції має широкий спектр функціональних можливостей, що суттєво підвищують ефективність її експлуатації. Вона забезпечує віддалений контроль роботи станції в режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на зміни в параметрах системи або можливі збої. Усі дані про продуктивність збираються, зберігаються та аналізуються. Це дає змогу

відстежувати роботу електростанції за різні періоди - добу, місяць чи рік, і таким чином виявляти тренди та закономірності.

У разі виявлення несправностей система автоматично надсилає сповіщення через SMS, електронну пошту або мобільний додаток, значно скорочуючи час реагування на потенційні проблеми. Окрім того, за допомогою аналізу виробітку електроенергії можливо виявити забруднення окремих панелей або технічні несправності, які впливають на загальну генерацію.

Ще однією перевагою є можливість інтеграції системи моніторингу до SCADA-середовища, що дозволяє поєднувати роботу СЕС з іншими енергетичними об'єктами та забезпечувати централізоване управління.

Висновки до четвертого розділу:

У розділі проаналізовано технічні особливості побудови сонячної електростанції, охарактеризовано основні компоненти системи, зокрема фотомодулі, інвертори, захисне обладнання та систему моніторингу SmartLogger 3000. Обґрунтовано вибір оптимального кута нахилу та азимуту панелей (20 та -20градусів) відповідно до географічного розташування об'єкта. З'ясовано, що правильне орієнтування панелей істотно впливає на загальну ефективність СЕС.

Встановлено, що застосування сучасної системи моніторингу на базі SmartLogger 3000 забезпечує високий рівень автоматизації та дозволяє оперативно контролювати технічний стан обладнання, виявляти несправності та прогнозувати ефективність роботи станції. Сформульовано вимоги до побудови моделі сонячної електростанції, що будуть враховані під час наступного етапу дослідження – комп'ютерного моделювання та аналізу роботи системи в умовах реального навантаження.

РОЗДІЛ 5

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖЕВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

5.1. Моделювання електричних параметрів мережевої СЕС

З метою дослідження впливу зовнішніх умов та параметрів конфігурації на електричні характеристики мережевої сонячної електростанції виконане моделювання в програмному середовищі PVsyst. Це програмне забезпечення дозволяє враховувати кліматичні умови, конструктивні особливості станції, топологію з'єднання обладнання та на основі цих даних оцінити роботу системи в часовому розрізі.

1. Створення нового проекту:

На першому етапі створено новий проект у PVsyst, у якому вказано:

Назву проекту: Дослідницька робота

Тип системи: Grid-connected (мережева СЕС)

Розташування станції: Нові петрівці (вказано на Рис. 5.1.)

Метеодані: обрано кліматичний файл Meteonorm



Рис. 5.1. Вигляд модельованої СЕС зверху

Особливості клімату описані в таблиці 1.1. та рис. 1.1.

2. Введення геометрії поля(вказано на Рис. 5.2.):

У вкладці System Design задано параметри встановлення панелей:

Тип монтажу: інсталяція на даху;

Азимут: -20° (відхилення на захід від півдня);

Кут нахилу панелей: 20° ;

Висота над дахом: прийнято 0.3 м.

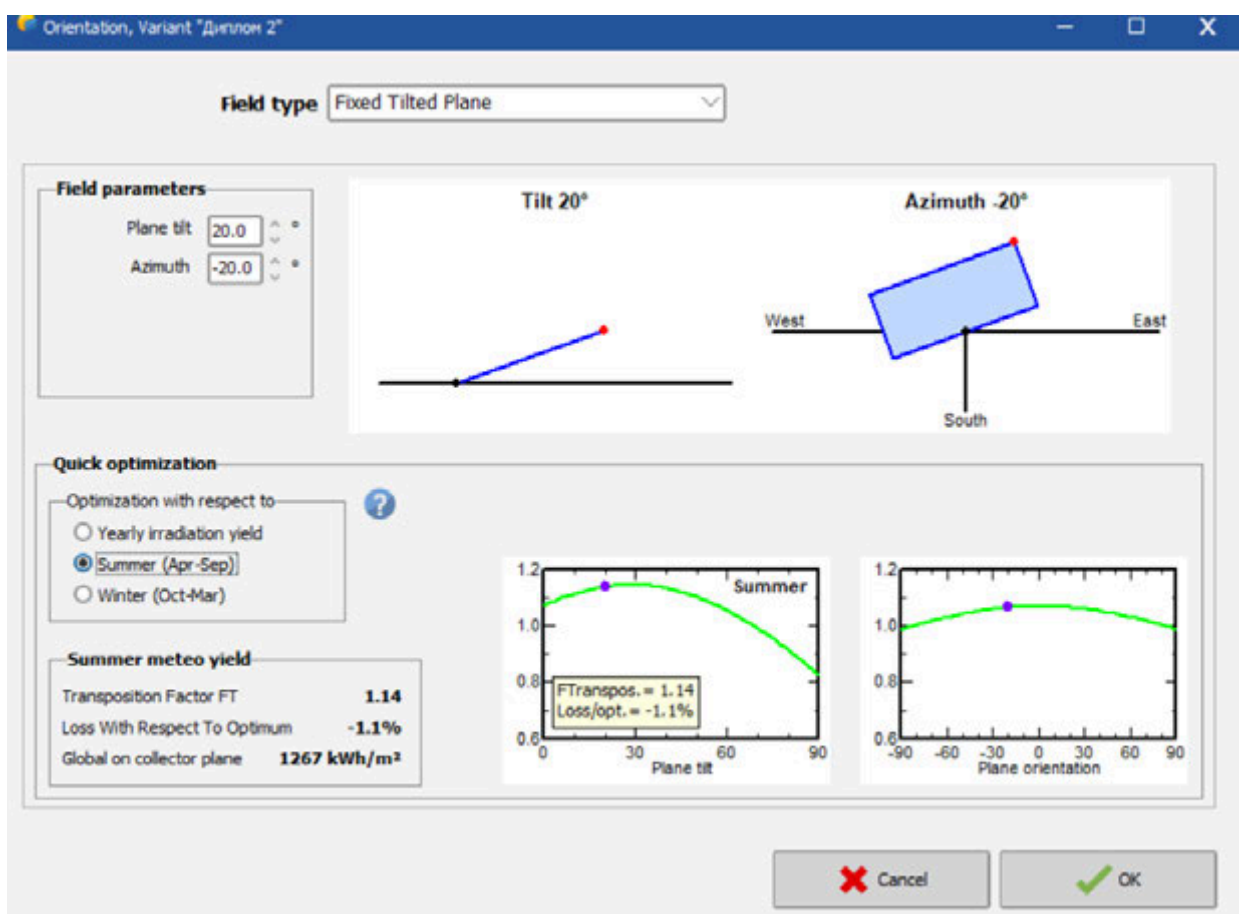


Рис. 5.2. Введення геометрії поля

3. Вибір та конфігурація обладнання (процес налаштування показано на Рис. 5.3.):

У модулі System були задані технічні характеристики обладнання, що використовується на об'єкті:

Фотомодулі: JA SOLAR JAM78S30-590/MR, 336шт, потужність 1 модуля - 590Вт.

Інвертори:

Huawei SUN2000-50KTL-M3 та Huawei SUN2000-100KTL-M1, 50+100кВт.

Схема з'єднання: 8+16 стрінгів, 14 панелей у стрінгу.

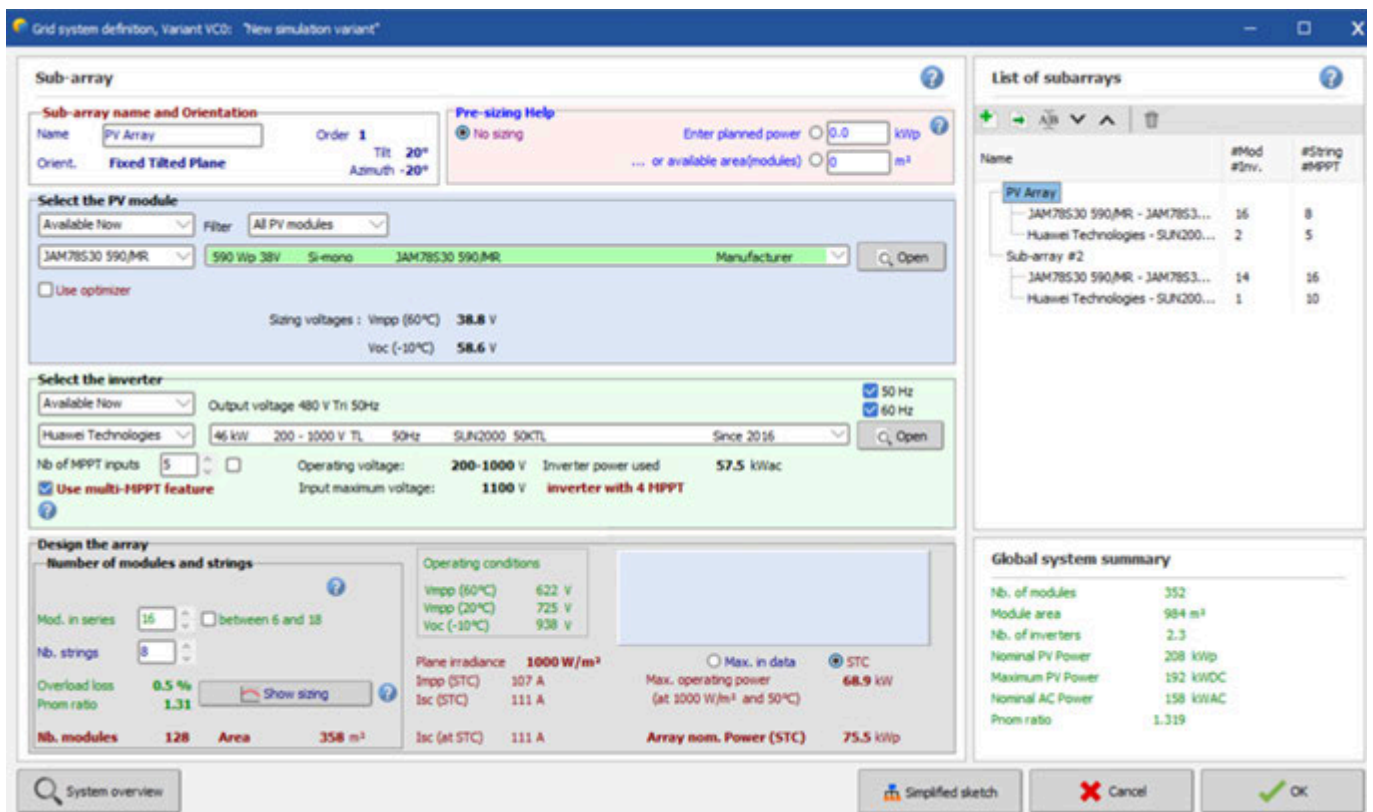


Рис. 5.3. Основні параметри СЕС

4. Визначення втрат у системі (діаграму показано на Рис. 5.4.):

Втрати на дротах (Ohmic Losses): прийнято 1,3%;

Втрати через пил/забруднення: прийнято до 2% ;

Втрати внаслідок температури: прийнято 0,8%;

Mismatch losses та LID(деградація, яка відбувається при першому опроміненні модуля світлом.) : прийнято 2%.

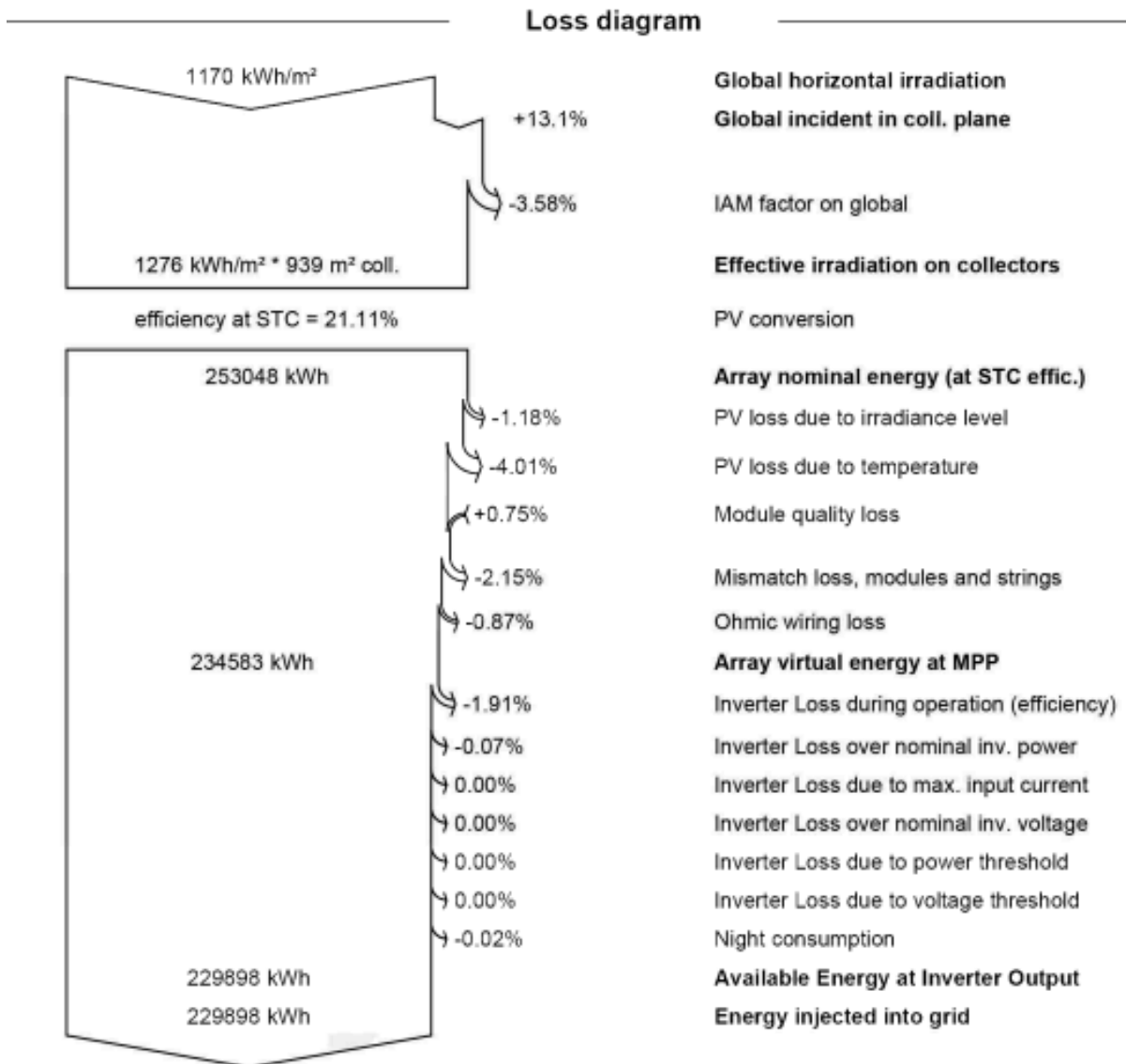


Рис. 5.4. Діаграма втрат

Після завершення конфігурації створено симуляцію на річний період.

Програма сформувала повний звіт, з якого були відібрані ключові параметри, а саме:

Загальне виробництво електроенергії: 229,898 Квт/рік;

PR (Performance Ratio): 87,63%.

Данні, що наведено нижче показано на Рис. 5.5.

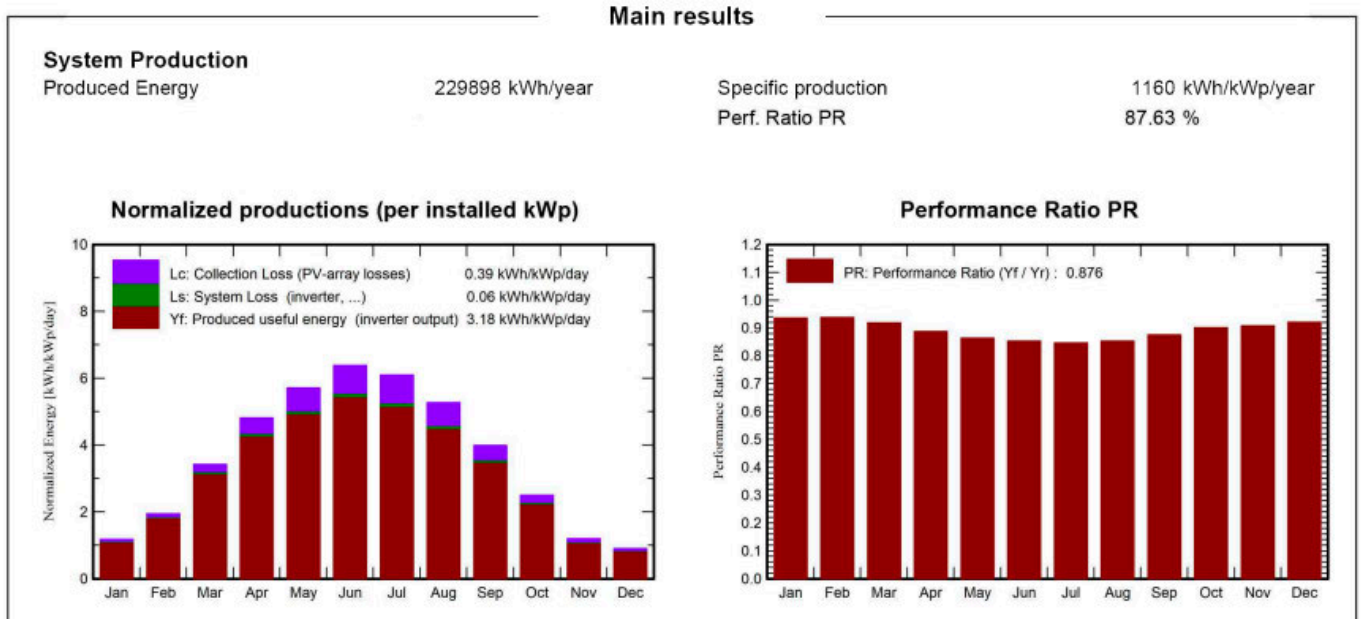


Рис. 5.5. Графіки виробітку електричної енергії

Енергетичний профіль по місяцях вказано на рис. 5.6

Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	24.5	15.43	-3.38	36.6	34.6	6911	6780	0.936
February	40.7	22.94	-2.61	54.4	51.9	10300	10115	0.938
March	87.8	42.20	2.53	106.2	102.3	19695	19338	0.919
April	127.4	54.25	10.05	144.5	139.9	25919	25427	0.888
May	168.7	75.35	16.22	177.1	171.3	30924	30324	0.864
June	185.0	79.94	19.05	191.5	185.6	33060	32394	0.853
July	181.5	82.87	21.43	189.0	183.1	32362	31711	0.846
August	150.2	71.51	20.56	163.4	157.9	28198	27645	0.854
September	101.4	47.97	14.42	119.7	115.2	21187	20793	0.876
October	59.5	32.41	8.47	77.4	74.1	14085	13835	0.902
November	25.2	14.79	3.40	35.8	33.9	6579	6448	0.908
December	18.5	11.87	-1.00	27.9	26.4	5196	5089	0.921
Year	1170.4	551.53	9.16	1323.4	1276.1	234417	229898	0.876

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_Grid	Energy injected into grid
T_Amb	Ambient Temperature	PR	Performance Ratio
GlobInc	Global incident in coll. plane		
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings		

Рис. 5.6. Профіль виробітку електричної енергії модельованої СЕС

5.2. Дослідження впливу зовнішніх чинників на електричні параметри

У ході моделювання та експериментальних досліджень встановлено, що зростання температури навколишнього середовища суттєво знижує електричні параметри фотомодулів (що демонструється на Рис. 5.7.) через посилення рекомбінації носіїв і зменшення напруги на ділянці максимуму потужності, з типовим температурним коефіцієнтом потужності $-0,45\ \%/^{\circ}\text{C}$.

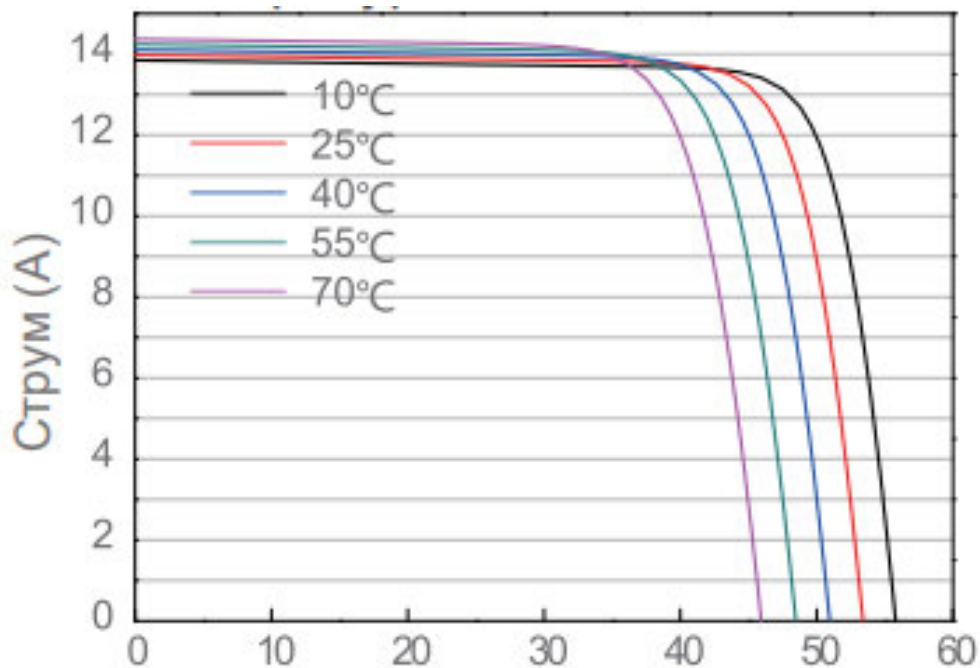


Рис. 5.7. ВАХ в залежності від температури JAM72S30-595/MR

За даними PVsyst, при підвищенні температури клітинки на $20\ ^{\circ}\text{C}$ від стандартних умов STC вихідна потужність знижується приблизно на $9\ \%$.

При збільшенні відносної вологості повітря на $42\ \%$ спостерігається зниження струму та напруги фотомодулів до $28,8\ \%$ порівняно з оптимальними умовами, що пов'язано з утворенням тонкого водяного шару на поверхні і посиленням корозійних процесів [17].

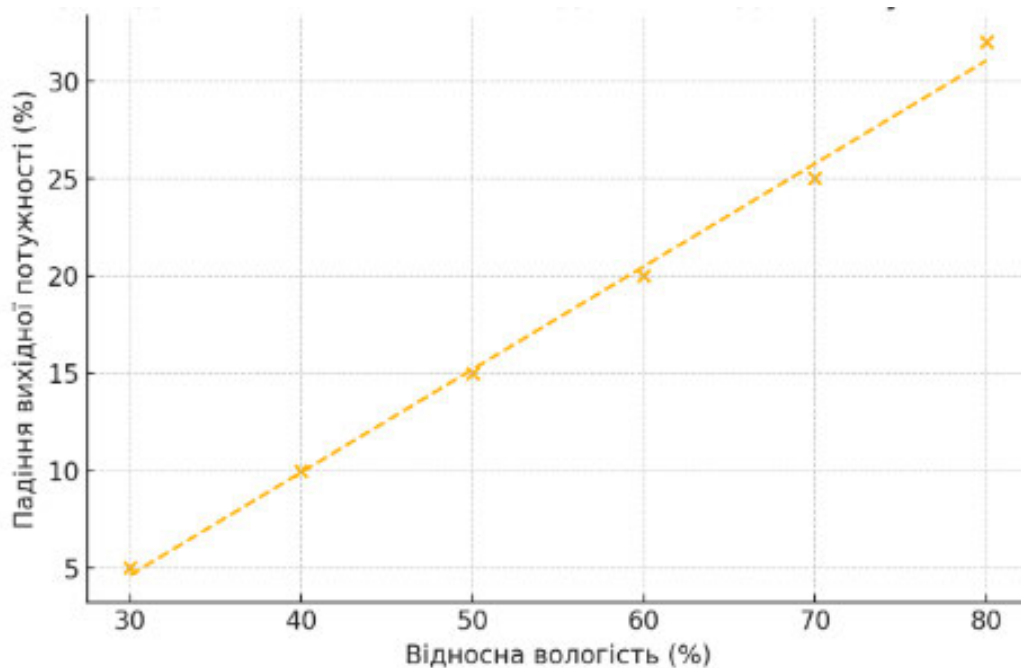


Рис. 5.8. Графік кореляції вологості та падіння вихідної потужності

Накопичення пилу також одна з найважливіших проблем, які призводять до загальних річних втрат енергії 3–5 % зі значним зниженням струму (до 28 % за шість місяців випробувань у пустельних умовах) [19].

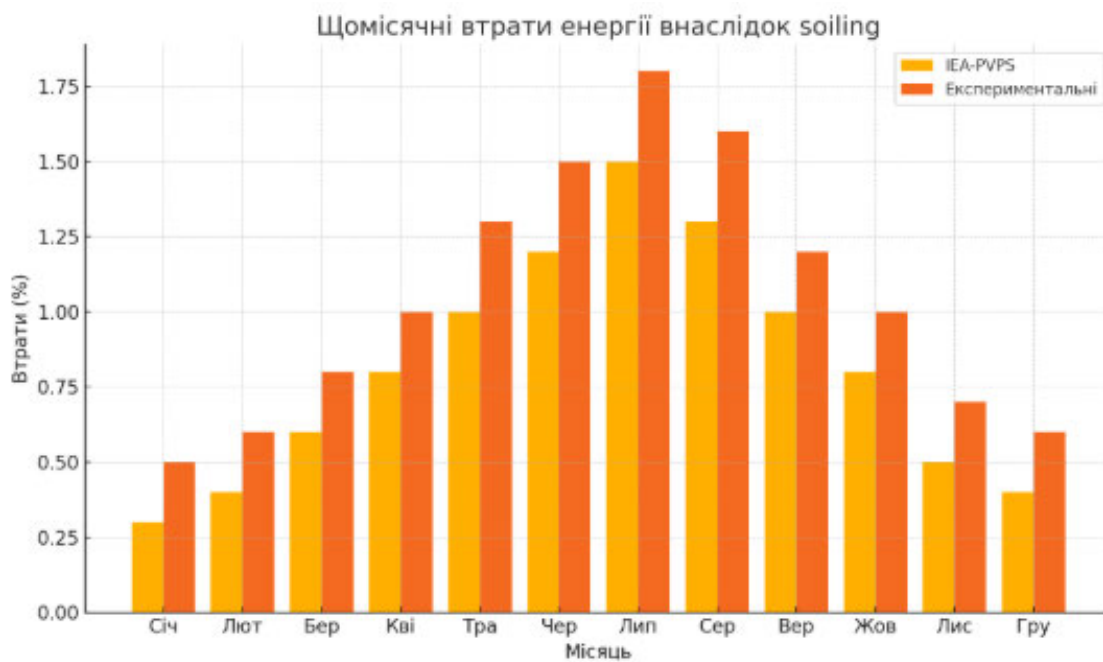


Рис. 5.9. Щомісячна діаграма втрат через пил за даними IEA-PVPS

Природне охолодження потоками вітру знижує температуру поверхні модулів на 5–10 °С при швидкості вітру 2–4 м/с, підвищуючи вихідну потужність на 1–3 %

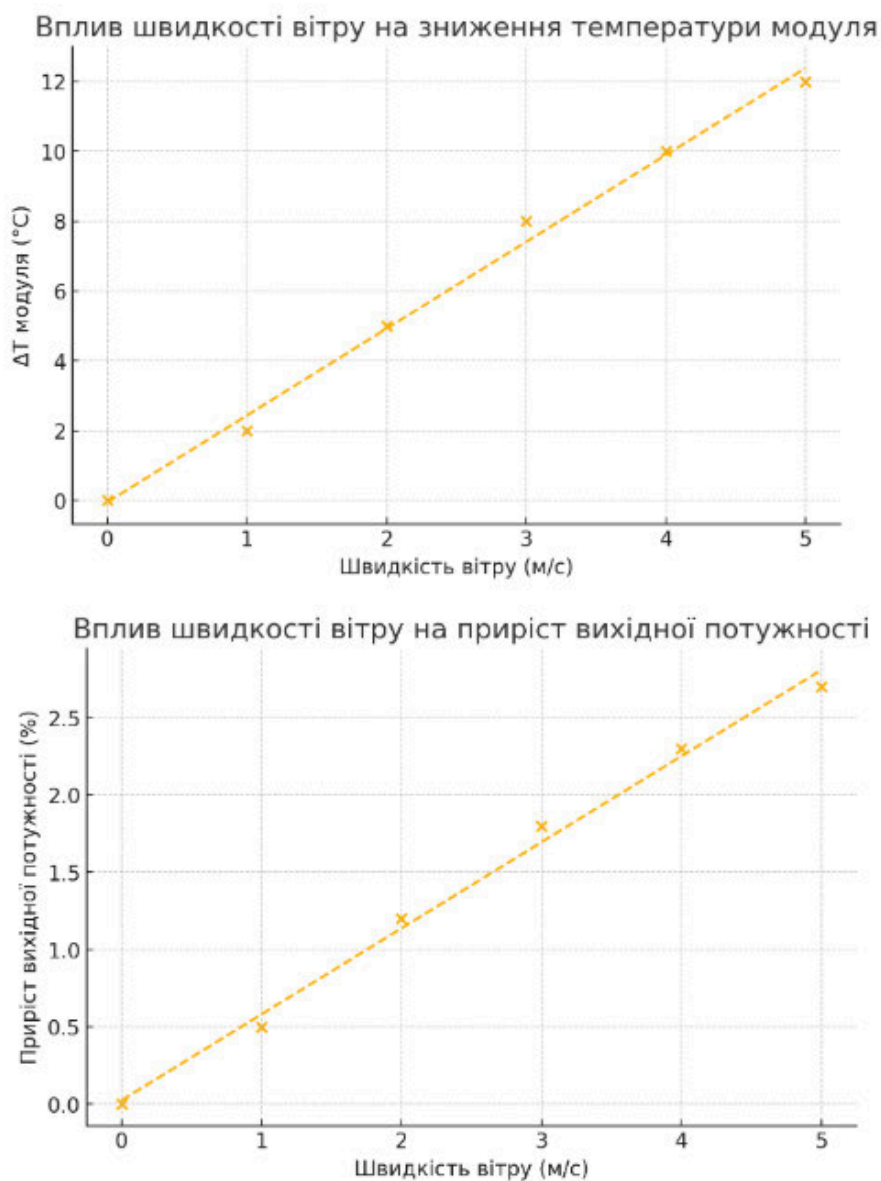


Рис. 5.10. Кореляційна діаграма впливу швидкості вітру на охолодження панелей та вихідну потужність

Активне охолодження за допомогою водяного розпилення дозволяє знизити температуру модуля з 61,96 °С до 36,51 °С і підвищити ККД із 10,98 % до 14,47 % при оптимальному розпиленні через форсунки діаметром 2 мм. [2]

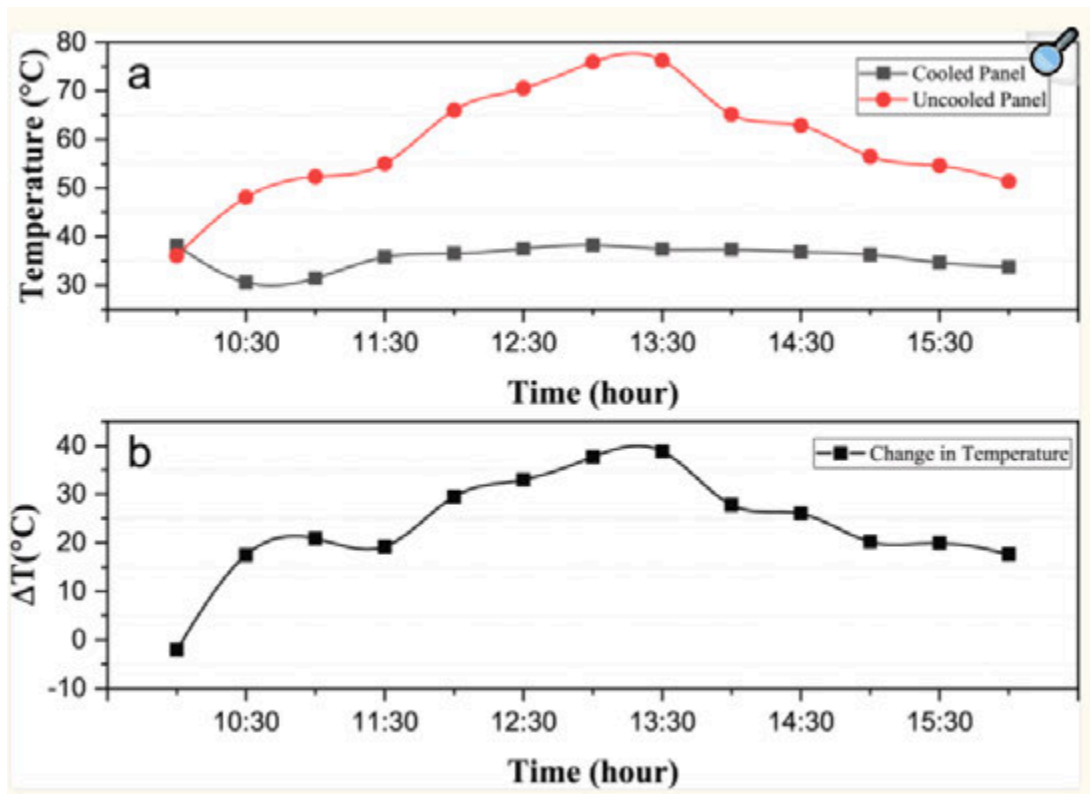


Рис. 5.11. Порівняння ефективності панелей з охолодженням та без нього

Передові пасивні методи охолодження, зокрема радіативне охолодження та використання фазових змінних матеріалів, демонструють додаткове зниження робочої температури до 15 °С без витрат енергії на обслуговування

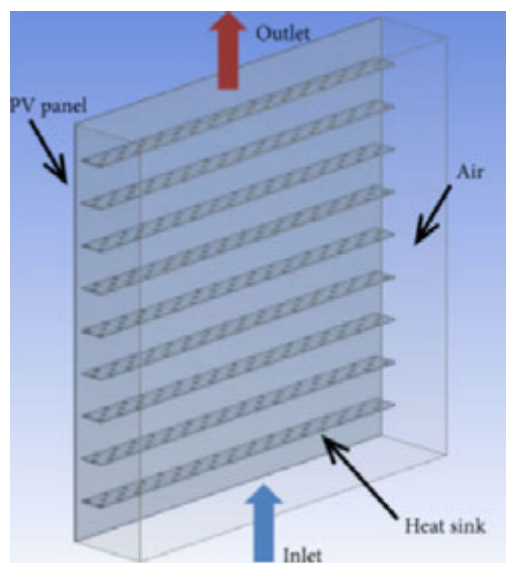


Рис. 5.12. Пасивна система охолодження з використанням радіативного охолодження панелей

Дослідження інтеграції допоміжних пристроїв, наприклад автоматизованих систем миття панелей або туманоутворювачі, показують додатковий приріст енерговіддачі 2–4 % протягом сухого сезону та зниження корозійних ризиків. Таблиця актуальності даних пристроїв зображена нижче «Див. Таблицю 5.1.»

Таблиця 5.1.

**Регіональні особливості впровадження автоматизованих систем
очищення сонячних панелей**

Регіон	Основні методи очищення	Ключові характеристики
Північна Америка	Автоматизовані системи, сухе очищення	Висока частка ринку (38,7% у 2024 році), особливо в США та Канаді. Широке впровадження роботизованих систем через великі масштаби сонячних ферм та сприятливу політику підтримки відновлюваної енергетики.
Азійсько-Тихо океанський регіон	Сухе очищення, роботизовані системи	Найвищі темпи зростання ринку завдяки швидкому розширенню сонячної енергетики в Китаї та Індії. Очікується перевищення обсягу ринку \$800 млн до 2032 року.

Близький Схід та Африка	Сухе очищення, роботизовані системи	Швидке зростання ринку через великі сонячні проекти в пустельних регіонах, де пил та пісок значно знижують ефективність панелей. Необхідність у водозберігаючих технологіях сприяє впровадженню сухих методів очищення.
Європа	Електростатичне очищення, роботизовані системи	Стабільне зростання ринку завдяки суворим екологічним нормам та акценту на водозбереження. Країни як Німеччина, Іспанія та Франція активно впроваджують екологічно чисті технології очищення.

Комбіноване застосування стратегій підтримки оптимальної температури, контролю вологості, своєчасного очищення модулів та використання вітрового охолодження, як показують роботи провідних дослідницьких груп, дозволяє підвищити загальну енергоефективність мережевої СЕС на 8–12 % порівняно з «базовим» сценарієм без допоміжних заходів. [20]

5.3. Дослідження економічної доцільності використання методів покращення ефективності сонячних панелей

З огляду на техніко-економічні аспекти впровадження інноваційних методів охолодження та очищення сонячних панелей для СЕС (336 панелей по 590 Вт,

загальна потужність 198 кВт, інвертори 50 кВт + 100 кВт), доцільність таких рішень залежить від очікуваного приросту ефективності та терміну окупності.

Автоматизовані системи очищення можуть підвищити ефективність СЕС на 12–20% . Однак, для досліджуваної СЕС з потужністю менше 200 кВт, економічна доцільність впровадження даних систем може бути обмеженою через високі початкові інвестиції та тривалий термін окупності.

Пасивне охолодження може знизити температуру панелей на 24,6 °С, і призводить до підвищення ефективності до 10,68% . Термін окупності систем становить приблизно 4,2–5 років, що може бути прийнятним, особливо враховуючи літні температури в Київській області. [21]

Інтеграція термоелектричних охолоджувачів може підвищити вихідну потужність на 9,27% влітку, з терміном окупності близько 6,5 років . Проте, такі системи вимагають додаткових інвестицій і можуть бути більш доцільними для великих СЕС.

Хоча технологія радіаційного охолодження перспективна, її ефективність у підвищенні продуктивності СЕС наразі обмежена, і вона більше підходить для дослідницьких або великих комерційних проектів.

З урахуванням вищезазначеного, для досліджуваної СЕС найбільш доцільним є впровадження пасивного охолодження з використанням ребер охолодження, що забезпечить помірне підвищення ефективності з прийнятним терміном окупності. Автоматизовані системи очищення та термоелектричне охолодження можуть бути менш ефективними з економічної точки зору окупності установки.

Враховуючи дані та результати досліджень, можна оцінити приблизний приріст річної потужності СЕС при впровадженні пасивного охолодження за допомогою ребер охолодження.

Приріст потужності при пасивному охолодженні:

Згідно з дослідженням, пасивне охолодження за допомогою ребер може знизити температуру панелей та підвищити їхню ефективність. Зокрема, використання прямокутних ребер охолодження призводить до:

1. Зниження середньої температури панелі: з 35°C до 28°C
2. Підвищення ефективності: з 15,0% до 16,1%
3. Загальний річний приріст енергії: з 340 кВт·год/м² до 365 кВт·год/м², що свідчить про збільшення на 7,3%

Враховуючи загальну встановлену потужність вашої СЕС (198,24 кВт) та середню інсоляцію в Київській області (приблизно 1100 кВт·год/кВт встановленої потужності на рік), базова річна генерація становить:

Базова генерація змодельованої СЕС становить 229 898 кВт·год

З урахуванням приросту на 7,3% при впровадженні пасивного охолодження:

Додаткова генерація: $229\,898 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 7,3\% \approx 16\,781 \text{ кВт}\cdot\text{год}$

Загальна генерація з охолодженням: $229\,898 \text{ кВт}\cdot\text{год} + 16\,781 \text{ кВт}\cdot\text{год} \approx 246\,679 \text{ кВт}\cdot\text{год}$

Впровадження пасивного охолодження за допомогою ребер охолодження може забезпечити додаткову річну генерацію електроенергії приблизно 16 781 кВт·год, що становить приріст на 7,3% від базової генерації. При мінімальному значенні 5% приросту додаткова генерація становитиме 11 495 кВт·год).

Це може бути економічно доцільним, особливо враховуючи відносно невисокі витрати на впровадження пасивних систем охолодження та потенційне зниження температурного навантаження на панелі, що також може продовжити їхній термін служби.

Висновки до п'ятого розділу:

У результаті моделювання електричних параметрів мережевої сонячної електростанції у програмному середовищі PVsyst було отримано узагальнене уявлення про енергетичну ефективність системи в умовах Київської області. Здійснено повний цикл конфігурації СЕС: від введення кліматичних даних та геометрії установки до вибору обладнання і розрахунку втрат.

Встановлено, що за заданої конфігурації (336 панелей по 590 Вт, інвертори Huawei SUN2000-50KTL та SUN2000-100KTL) щорічне виробництво електроенергії

становить 229 898 кВт·год, при коефіцієнті ефективності (PR) - 87,63%, що є високим показником для середньоширотного регіону. У моделі враховано типові втрати: на проводах, через запилення, температурні впливи, деградацію та невідповідність характеристик модулів (mismatch).

Таким чином, проведене моделювання не лише підтверджує ефективність обраної конфігурації, а й створює базу для подальшого аналізу впливу зовнішніх чинників (температури, вологості, запилення) на роботу системи. Це дозволяє аргументовано обґрунтовувати доцільність застосування додаткових технологічних рішень для підвищення продуктивності СЕС.

РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1. Нормативні вимоги щодо охорони праці під час експлуатації сонячних електростанцій

Основною вимогою, що визначає надійність будівельного об'єкта, є його відповідність призначенню і здатність зберігати необхідні експлуатаційні якості (гарантія безпеки для здоров'я людей, майна та навколишнього середовища, збереження цілісності об'єкта і його основних частин, виконання вимог, що гарантують можливість використання об'єкта за призначенням і нормального функціонування технологічного процесу, забезпечення можливості розвитку об'єкта, обмеження ступеня ризику, безвідмовності роботи захисних пристроїв, надійності систем і мереж життєзабезпечення, живучості будівельних конструкцій і т.п.) протягом встановленого терміну експлуатації.

Надійність функціонування ліній та електрообладнання забезпечується використанням сучасної мікропроцесорної техніки підвищеної надійності, а також систем автоматики, сигналізації та оповіщення, здатної визначати внутрішні несправності і запобігати утворенню аварій.

Роботи на території об'єкту мають небезпеку ураження електричним струмом, в зв'язку з цим експлуатація повинна здійснюватися на підставі ПТЕЕС і ПБЕЕС, а також інструкцій і правил, що діють на підприємстві.

Надійність і конструктивна безпека проєктованих споруд досягається в результаті використання повноти та достовірності вихідних даних, по типу технічних параметрів існуючого обладнання та якісних будівельних матеріалів і конструкцій.

Для забезпечення безпечної експлуатації сонячних електростанцій (СЕС) потужністю понад 100 кВт в Україні необхідно суворо дотримуватись чинних законодавчих і нормативних актів, що регламентують охорону праці та безпеку електроустановок. Основними документами, що регулюють ці вимоги, є Правила

улаштування електроустановок (ПУЕ), Державні будівельні норми (ДБН), державні стандарти України (ДСТУ) та міжнародний стандарт [23].

[17] встановлюють вимоги до електробезпеки при експлуатації електроустановок, включаючи СЕС. Зокрема, вони регламентують порядок заземлення електрообладнання, використання захисних пристроїв, вимоги до електропроводки та інші аспекти, які забезпечують безпечну роботу електроустановок. [17] також визначають вимоги до організації робіт під напругою, заходів безпеки при експлуатації електротехнічного обладнання та допустимі режими роботи електроустановок залежно від їх класу напруги [17].

Державні будівельні норми [33] встановлюють вимоги до охорони праці та промислової безпеки у будівництві, що безпосередньо стосується етапу монтажу та встановлення сонячних панелей і інверторного обладнання на об'єкті СЕС. Норми регулюють питання безпечної організації робочого місця, застосування ЗІЗ, організації робіт на висоті та тимчасових електромереж.

Державний стандарт України [23] визначає систему управління охороною праці і безпекою на підприємствах, та передбачає розробку політики в сфері охорони праці, виявлення небезпек, оцінку ризиків та визначення заходів контролю. Цей стандарт рекомендує впровадження процедур навчання персоналу з питань охорони праці, регулярне проведення внутрішніх аудитів та забезпечення постійного покращення системи управління безпекою праці [23].

Окрему увагу слід приділити вимогам безпеки для СЕС потужністю понад 100 кВт. Такі електростанції підпадають під вимоги щодо підключення до мережі з обов'язковим виконанням заходів із захисту від коротких замикань, грозозахисту та встановлення систем аварійного відключення. Необхідною є організація зон безпечного доступу навколо електроустановок, встановлення застережних знаків і маркувань високої напруги, а також забезпечення можливості дистанційного моніторингу стану системи для оперативного виявлення небезпечних ситуацій. Всі роботи мають виконуватись виключно персоналом, який має відповідну групу допуску до робіт в електроустановках напругою понад 1000 В згідно з нормативами [17].

Дотримання цих нормативних вимог є запорукою безпечної експлуатації сонячної електростанції, мінімізації виробничих ризиків і забезпечення стабільної роботи об'єкта у складі об'єднаної енергетичної системи України.

Обслуговування сонячних електростанцій (СЕС) вимагає високої кваліфікації персоналу та дотримання суворих вимог до безпеки. Згідно з чинними нормативними документами, працівники, які обслуговують СЕС, повинні мати відповідну групу допуску з електробезпеки. Для робіт в електроустановках напругою понад 1000 В необхідна не нижче четвертої групи допуску, що передбачає проходження спеціального навчання, перевірку знань та періодичне підтвердження кваліфікації. Це забезпечує належний рівень знань з техніки безпеки, правил експлуатації електроустановок та дій у разі аварійних ситуацій.

Перевірка справності заземлення, захисту від перенапруг та грозозахисту є критично важливою для безпечної експлуатації СЕС. Згідно з [17], заземлення повинно забезпечувати опір не більше 4 Ом для електроустановок напругою до 1000 В та не більше 0,5 Ом для установок напругою понад 1000 В. Регулярна перевірка стану заземлювальних пристроїв, блискавкозахисту та пристроїв захисту від перенапруг повинна проводитись не рідше одного разу на рік. Це включає вимірювання опору заземлення, огляд стану контактних з'єднань та перевірку працездатності захисних пристроїв [17].

Системи моніторингу забезпечують постійний контроль за роботою обладнання СЕС. Для безпечної експлуатації цих систем необхідно дотримуватись вимог щодо їх встановлення та обслуговування. Пристрій моніторингу повинен бути встановлений у захищеному від вологи та пилу місці, з дотриманням вимог до температурного режиму та вентиляції. Підключення до мережі повинно здійснюватись через захисні пристрої, що забезпечують захист від перенапруг та коротких замикань. Персонал, який обслуговує системи моніторингу, повинен бути ознайомлений з інструкціями виробника та мати відповідну кваліфікацію для роботи з електронним обладнанням.

Дотримання зазначених вимог забезпечує безпечну та ефективну експлуатацію сонячних електростанцій, мінімізує ризики для персоналу та обладнання, а також сприяє довготривалій та безперебійній роботі СЕС.

6.2. Заходи безпеки при монтажі та управлінні обладнанням

Під час монтажу сонячних панелей на дахах необхідно дотримуватись суворих заходів безпеки, оскільки такі роботи класифікуються як роботи на висоті. Згідно з нормативами [30], роботи на висоті - це ті, що виконуються на висоті 1,3 м і більше від поверхні ґрунту або перекриття, а також на відстані менше 2 м від негороджених перепадів висоти 1,3 м і більше. У таких умовах обов'язковим є використання ЗІЗ - захисні каски, страхувальні пояси та спеціальне взуття.

Захисні каски повинні відповідати вимогам стандартів та технічних умов, мати інвентарні номери та проходити періодичні випробування. Страхувальні пояси (запобіжні пояси) мають бути оснащені системою ременів для кріплення до тіла працівника та системою кріплення до надійної опори. Перед початком роботи необхідно переконатися в міцності опор, до яких буде закріплюватися строп запобіжного пояса, та елементів верхолазного спорядження. Вони повинні надійно витримувати зусилля, яке може виникнути при падінні людей. Також слід враховувати, що довжина стропа повинна бути встановлена так, щоб висота вільного падіння людини не перевищувала 0,5 м, а місце закріплення пояса без амортизатора за опору вибирається так, щоб висота вільного падіння не перевищувала 1 м. згідно[30].

Спеціальне взуття повинно відповідати вимогам безпеки для кожного конкретного виду робіт, характеру та умов праці, виду і тривалості дії небезпечних і/або шкідливих виробничих факторів. ЗІЗ застосовуються тоді, коли безпечність робіт не може бути забезпечена конструкцією обладнання, організацією виробничих процесів, архітектурно-планувальними рішеннями та засобами колективного захисту.

Крім того, перед початком робіт на висоті необхідно переконатися в міцності опор, до яких буде закріплюватися строп запобіжного пояса, та елементів верхолазного спорядження. Вони повинні надійно витримувати зусилля, яке може виникнути при падінні людей. Також потрібно враховувати, що довжина стропа повинна бути встановлена таким чином, щоб висота вільного падіння людини не перевищувала 0,5 м, а місце закріплення пояса без амортизатора за опору вибирається так, щоб висота вільного падіння не перевищувала 1 м. згідно [30].

Дотримання цих заходів безпеки є критично важливим для запобігання нещасним випадкам та забезпечення безпечної роботи персоналу при монтажі сонячних панелей на дахах.

Під час монтажу інверторів необхідно закріпити їх на міцній, рівній поверхні, захищеній від прямих опадів і ультрафіолету, з урахуванням мінімальних зазорів для повітрообміну згідно з рекомендаціями виробника та загальними керівництвами з очистки повітря навколо обладнання. Інвертори мають бути розміщені в затіненому, вентиляваному місці, щоб запобігти перегріванню, із залишенням не менше 30 см вільного простору навколо корпусу.

Всі кабелі постійного струму (DC) прокладають окремо від змінного (AC) у захищених каналах із використанням сертифікованих PV-кабелів типу ПВ-1 Ф або згідно з вимогами [31] для запобігання механічним пошкодженням і помилковому підключенню. При роботі з високовольтними кабелями працівники повинні користуватись діелектричними рукавичками класу III (1000 В) та ізольованим інструментом, а перед укладанням і підключенням проводів необхідно перевірити їх ізоляцію мегометром із робочою напругою, що перевищує номінальну, не рідше ніж раз на рік.

Монтаж на даху класифікується як робота на висоті понад 1,3 м, тому передбачає застосування **зіз**: сертифікованих касок, страхувальних поясів з амортизаторами, кріпленням до перевірених анкерних точок та спецвзуття з протиковзким покриттям. Довжина стропа поясу має бути відрегульована так, щоб висота вільного падіння не перевищувала 0,5 м, а кріпильні елементи витримували подвійне навантаження від ваги працівника.

У спекотний період роботи на відкритому майданчику вимагають додаткових заходів: планування монтажу у ранкові та вечірні години, встановлення мобільних тінювих павільйонів, забезпечення питною водою температурою 10–15 °С та часті перерви для охолодження згідно з рекомендаціями з попередження теплового стресу. Для зниження перегріву робочої зони можна використовувати вентилятори для підвищення конвективного охолодження, якщо температура навколишнього повітря не перевищує 35 °С.

Загалом дотримання комплексу технічних, організаційних і індивідуальних заходів безпеки гарантує безпечну та ефективну роботу персоналу при монтажі й обслуговуванні обладнання сонячної електростанції.

6.3. Аналіз ризиків та пропозиції щодо їх мінімізації

У рамках аналізу ризиків при експлуатації та обслуговуванні дахової мережевої СЕС ключовими небезпеками є електричні ураження, падіння з висоти та тепловий стрес. Для кожного з цих ризиків міжнародні та національні стандарти встановлюють конкретні норми та правила: від вибору обладнання й прокладки кабелів до організації робіт на висоті та запобігання перегріву персоналу. Дотримання вимог міжнародних та місцевих будівельних норм гарантує зниження ймовірності аварій та захворювань, а запропоновані технічні, організаційні й індивідуальні заходи мінімізують залишкові ризики.

Нормативна база:

[26] встановлює вимоги до проектування та монтажу PV-систем низької напруги, включно із захистом від перенапруг, розміщенням вимикачів на постійному та змінному струмі й правилами прокладки кабелів DC/AC. Також [28] вимагає первинної перевірки монтажу та періодичного тестування обладнання, у тому числі із застосуванням мегометра для перевірки опору ізоляції кабелів не рідше ніж щороку.

Норми [30] зобов'язують обладнати робочі місця анкерними точками, риштуванням або захисними сітками, а також використовувати сертифіковані

страхувальні пояси з амортизаторами, розрахованими на навантаження не менше ніж 3 кН.

Аналіз ризиків:

Під час монтажу й техобслуговування існує ризик дотику до живих частин та пошкодження ізоляції кабелів. Бездіяльність аварійного відключення може призвести до тяжких травм.

Роботи на даху з нахилом 20° та азимутом -20° автоматично відносяться до робіт на висоті понад 1,3 м, що суттєво збільшує ймовірність падіння.

Висока температура поверхні покрівлі та відсутність тіні призводять до перегріву персоналу та зниження концентрації, що підвищує загальний ризик нещасних випадків.

Пропозиції щодо мінімізації:

1. Встановити аварійні вимикачі на постійному і змінному струмі в кожному секціонованому блоці, а також УЗО типу В.

2. Регулярно (щоквартально) перевіряти справність ізоляції кабелів, працездатність захисних пристроїв і опір заземлення за допомогою мегометра, із дотриманням вимог [28].

3. Усім працівникам видавати страхувальні пояси з амортизатором та карабінами, а монтажні ділянки обладнати стаціонарними анкерними точками згідно з [30]. Довжина стропа має обмежувати вільне падіння до 0,5 м, а обладнання витримувати навантаження ≥ 3 кН.

4. Впровадити моніторинг WBGT та індексу спеки на майданчику, забезпечити роботу в ранкові/вечірні години, створити тіньові павільйони та зони відпочинку з охолоджуваною водою. Нових працівників вводити в роботу відповідно до 20 % правила акліматизації та забезпечити щотижневі інструктажі щодо виявлення теплового стресу.

5. Регулярно проводити комплексні інструктажі з охорони праці, включно з практичними відпрацюваннями аварійного відключення, алгоритмів дій при падінні й наданні першої допомоги при тепловому ударі.

Згідно з пунктом 7.1.55 [17] та розділом 712 [26], при кріпленні фотоелектричних модулів на дахових конструкціях слід передбачати вентиляційний зазор не менше 30 мм між задньою поверхнею панелі та покрівлею. Такий простір забезпечує ефективну конvekцію повітря і відвід надлишкового тепла від фотоелементів, що гарантує збереження електричних параметрів ФЕМ при високих температурах. Відсутність або зменшення цього зазору призводить до накопичення тепла, зростання робочої температури на 20–25 °С і відповідного зниження ККД панелей, описаного в [27].

Пожежна безпека кабельних ліній регламентується [29] та пунктом 712 [26], які зобов'язують застосовувати для прокладки постійного струму кабелі з маркуванням «не підтримує горіння» і «low smoke» [26].

Кабелі прокладаються в окремих каналах з дотриманням рекомендацій виробника та стандарту [28]: вони мають бути ізольовані від трас змінного струму й відстань між ними не менше 50 мм, щоб уникнути теплових перехресть. Регулярний аудит стану ізоляції проводять згідно з вимогами [28]: щорічний інфрачервоний контроль з'єднань, перевірка опору ізоляції мегометром і огляд кріплень кабелів дозволяють виявити місця можливого розігріву або пошкодження й запобігти коротким замиканням та виникненню пожежі.

Під час монтажу та експлуатації дахової найістотнішими ризиками є: електричні ураження, падіння з висоти, перегрів панелей та обладнання, короткі замикання, пожежа та грозові перенапруги. Для зниження ймовірності небезпечних подій необхідно дотримуватися наступних норм і правил:

1. При визначенні стратегії захисту від грозових перенапруг та ураження блискавкою слід керуватися [17] який зобов'язує проектувати зовнішній і внутрішній блискавкозахист з розрахунком на загальний опір заземлення не більше ніж 10 Ом. Згідно з [26] необхідно встановлювати обмежувачі перенапруг класів II або III на вводах постійного і змінного струму, щоб захистити внутрішню мережу від імпульсів блискавки. Для цих цілей у розподільних шафах та безпосередньо біля інверторів використовують модулі обмеження перенапруги з номінальним струмом спрацювання не менше 20 кА.

2. Перегрів фотоелектричних модулів через недостатню вентиляцію призводить до зниження ККД і прискореної деградації комірок. Норми [27] вимагають передбачати зазор не менше 30 мм між задньою поверхнею панелі та покрівлею, яка забезпечує природну конвекцію й відвід тепла від панелей.

3. Короткі замикання в кабелях можуть спричинити розігрів і пожежу. Для мінімізації цього ризику прокладають кабелі, які не поширюють горіння і виділяють низький рівень диму при нагріві [29]. Регулярний аудит кабельних трас передбачає щорічні інфрачервоні обстеження з'єднань, перевірку опору ізоляції мегометром та огляд кріплень, щоб виявити можливі місця підвищеного опору або механічного пошкодження.

4. Падіння з висоти під час монтажу панелей на даху регламентується нормами [30], які зобов'язують облаштування анкерних точок, риштувань або захисних сіток та обов'язкове використання страхувальних поясів з амортизаторами, розрахованими на навантаження не менше ніж 3 кН. Довжина стропа має обмежувати висоту вільного падіння до 0,5 м.

5. Тепловий стрес працівників у спекотні періоди зводять до мінімуму шляхом планування робіт у ранкові та вечірні години, обладнання тіньових павільйонів, забезпечення доступу до холодної питної води та регулярних перерв для відпочинку і охолодження [25].

Для швидкого виявлення аварійних подій і мінімізації часу реакції рекомендується впровадити систему дистанційного моніторингу, що дозволяє в режимі реального часу відстежувати показники напруги, струму, температури та швидко сигналізувати про відхилення від нормальних параметрів.

Загалом застосування комплексу технічних, організаційних та індивідуальних заходів згідно з міжнародними й національними нормами забезпечує суттєве зниження залишкових ризиків, підвищує безпеку персоналу та надійність експлуатації СЕС.

Висновки до шостого розділу:

У розділі проаналізовано нормативні вимоги щодо безпеки праці при проектуванні, монтажі та експлуатації сонячної електростанції. Визначено основні технічні та організаційні заходи, які забезпечують безпечні умови роботи для персоналу, яка здійснює монтаж і обслуговування обладнання. Особливу увагу приділено роботам на висоті, захисту від ураження електричним струмом, перевірці стану кабельних систем, грозозахисту та заходам попередження теплового стресу.

Встановлено, що для безпечної експлуатації СЕС необхідним є дотримання вимог національних стандартів і норм. Забезпечення охорони праці передбачає обов'язкове застосування сертифікованих ЗІЗ, наявність анкерних систем та систем дистанційного моніторингу стану обладнання. Запропоновані рекомендації та механізми мінімізації ризиків ґрунтуються на аналізі потенційних небезпек та відповідають сучасним вимогам з безпеки виробництва. Це дозволяє гарантувати надійність та ефективність експлуатації об'єкта у довгостроковій перспективі.

ВИСНОВКИ

У цій магістерській роботі досліджено ефективність генерації електричної енергії мережею сонячною електростанцією потужністю 150 кВт. Проведено всебічний аналіз електричних параметрів СЕС з урахуванням особливостей її проектування, моделювання та оптимізації в умовах реального кліматичного середовища. Проаналізовано отримані експериментальні дані, оцінено вплив зовнішніх чинників на виробіток електроенергії, а також обґрунтовано вибір технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності функціонування обладнання. Основна увага приділялася аналізу ефективності функціонування обладнання, вибору відповідних технічних рішень та впливу зовнішніх чинників на генерацію електроенергії.

В дослідженні обґрунтовано необхідність аналізу електричних параметрів сонячної електростанції потужністю 150 кВт в умовах зростання ролі відновлюваних джерел енергії. Підкреслено, що ефективність СЕС залежить від таких факторів, як температура, інсоляція, вологість, а також конструктивні особливості та властивості матеріалів, з яких виготовлено фотомодулі. Наведено дані про зростання ефективності панелей з 15% до 22–23% за останнє десятиліття, що вказує на реальний технологічний прогрес і перспективу оптимізації. Визначено, що дослідження електричних характеристик дозволяє підвищити точність прогнозування генерації енергії та надійність роботи СЕС в реальних умовах. Описано базові методи аналізу - прямі вимірювання, моделювання, збір даних через систему моніторингу. Обґрунтовано доцільність вибору об'єкта дослідження - СЕС 150 кВт як оптимального рішення для малого та середнього бізнесу.

У ході виконання розкрито принципи роботи сонячних електростанцій, охарактеризовано типи фотомодулів і наведено їх технічні особливості, що безпосередньо впливають на електричні параметри системи. Деталізовано конструкцію фотоелемента, принцип фотоелектричного ефекту та особливості роботи інверторів, які забезпечують перетворення постійного струму в змінний для передачі в мережу. Звернено увагу на переваги сучасних монокристалічних модулів і

перспективні технології - перовськітні та тандемні структури, ефективність яких у лабораторних умовах досягає 29–31%. Аналіз технологічних рішень показав, що впровадження двосторонніх модулів, TopCon, PERC-технології дозволяє підвищити загальний ККД станції до 27% і більше, з можливістю роботи в широкому спектрі умов освітлення. Також узагальнено результати попередніх практичних та теоретичних досліджень, що виявили втрати потужності внаслідок підвищеної температури (до 25%), запилення (до 30%) і затінення (до 15–25%). Таким чином, обґрунтовано важливість врахування зовнішніх факторів, геометрії установки та якості обладнання для забезпечення стабільної роботи СЕС і мінімізації енергетичних втрат.

В розрахунковій частині представлено структурно-функціональну схему сонячної електростанції потужністю 150 кВт, розроблену з урахуванням вимог до ефективності та надійності роботи. Обрано сучасні фотомодулі JA Solar JAM78S30-590/MR з потужністю 590 Вт кожен, загальною кількістю 336 штук, що забезпечує сумарну встановлену потужність 198 кВт. Для перетворення енергії використано два інвертори Huawei SUN2000: один на 100 кВт, інший на 50 кВт, що дозволяє гнучко розподіляти навантаження між стрінгами. Схема з'єднання модулів оптимізована на основі 14 панелей у стрінгу, що відповідає робочим параметрам інверторів. Розглянуто особливості електричного захисту системи, включаючи встановлення автоматичних вимикачів, заземлення та захист від перенапруг. Визначено, що правильне компонування елементів дозволяє досягти стабільної генерації енергії при мінімальних втрат на проводах, що не перевищують 1,3%. Запропонована конфігурація відповідає технічним вимогам до безпеки, продуктивності та ефективності СЕС середнього масштабу.

Також проаналізовано ключові технологічні рішення, що впливають на ефективність СЕС, зокрема орієнтацію панелей (азимут -20° , нахил 20°), тип монтажу та вентиляцію. Розміщення панелей із зазором 0,3 м сприяє охолодженню і зменшує теплові втрати, що позитивно впливає на стабільність напруги. Для підвищення надійності впроваджено систему моніторингу SmartLogger 3000, яка забезпечує контроль параметрів у реальному часі, оперативне виявлення збоїв та

прогнозування ефективності. Комплексний підхід до проектування та керування створює умови для стабільної та безпечної роботи станції.

В дослідницькій частині роботи виконано комп'ютерне моделювання роботи сонячної електростанції потужністю 150 кВт у середовищі PVsyst з урахуванням кліматичних особливостей Київської області та конфігурації обладнання. За результатами симуляції отримано щорічну генерацію електроенергії в обсязі 229 898 кВт·год при коефіцієнті продуктивності (PR) на рівні 87,63%, що свідчить про високу ефективність системи. Враховано типові втрати: 1,3% - на проводах, до 2% - через забруднення, 0,8% - температурні, а також mismatch-ефект та первинну деградацію.

Проаналізовано вплив зовнішніх факторів: при зростанні температури на 20 °C вихідна потужність панелей знижується на 9%, при підвищенні вологості на 42% - зменшення генерації сягало 28,8%. Дослідження показали, що запилення може спричинити річні втрати до 5%, а пасивне охолодження за допомогою ребер дозволяє знизити температуру модулів та підвищити ККД з 15% до 16,1%, що забезпечує додаткову річну генерацію на 7,3% ($\approx 16\,781$ кВт·год).

Оцінено економічну доцільність впровадження допоміжних рішень. Найоптимальнішим для станції є пасивне охолодження, яке має короткий термін окупності (≈ 5 років) при невисоких витратах. Інші методи - термоелектричне охолодження, роботизоване очищення або активні системи - мають вищі капітальні затрати й виправдані здебільшого для великих СЕС.

Отримані результати підтверджують, що правильно обрана конфігурація обладнання та впровадження простих енергоефективних рішень дозволяють істотно підвищити продуктивність станції без значного збільшення вартості проєкту.

В заключній частині роботи розглянуто вимоги до охорони праці під час проєктування, монтажу та експлуатації сонячної електростанції потужністю 150 кВт. Зазначено, що безпечна робота персоналу та надійність обладнання досягаються завдяки дотриманню чинних нормативів, зокрема ПУЕ, ДБН, ДСТУ, а також міжнародних стандартів систем управління охороною праці. Визначено основні небезпеки, пов'язані з ураженням електричним струмом, роботами на висоті,

приєднанням до мережі та обслуговуванням високовольтного обладнання. У роботі враховано вимоги до заземлення, використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), навчання персоналу та технічної документації. Окрему увагу приділено забезпеченню електробезпеки при роботі з інверторами, системами захисту та моніторингу. Вказано, що застосування сучасного обладнання, мікропроцесорних систем керування та автоматики знижує ризики аварій і підвищує рівень контролю за станом об'єкта. Забезпечення охорони праці є невіддільною частиною проектування СЕС і гарантує довготривалу й безпечну експлуатацію системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Куди рухається сонячна енергетика в Україні та світі. Які можливості в цій сфері існують для бізнесу [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: <https://oppb.com.ua/news/kudy-ruhayetsya-sonyachna-energetyka-v-ukrayini-ta-sviti-yaki-mozhlyvosti-v-tsiy-sferi-isnuyut-dlya-biznesu> (дата звернення: 12.03.2025).
2. Effect of dual surface cooling of solar photovoltaic panel on the efficiency of the module: experimental investigation [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8424511/> (дата звернення: 12.03.2025).
3. Fabrication and electrical characterization of Cu-Cu₂O photo electro chemical solar cells [Електронний ресурс] // ResearchGate. Режим доступу до сервера: <https://www.researchgate.net/publication/373682928> (дата звернення: 17.02.2025).
4. Real solar cell and determination methods of electrical parameters [Електронний ресурс] // ResearchGate. Режим доступу до сервера: <https://www.researchgate.net/publication/370746485> (дата звернення: 17.02.2025).
5. Перспективні технології фотоелектричної сонячної енергетики [Електронний ресурс] // Центр Разумкова. Режим доступу до сервера: <https://razumkov.org.ua/statti/perspektyvni-tekhnologii-fotoelektrychnoi-soniachnoi-energetyky> (дата звернення: 12.03.2025).
6. JinkoSolar встановила світовий рекорд ефективності (ККД) сонячного модуля на рівні – 24,8% [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: <https://expro.com.ua/novini/jinkosolar-vstanovila-svtoviy-rekord-efektivnost-kkd-sonyachnogo-modulya-na-rvn-248> (дата звернення: 17.02.2025).
7. Про встановлення "зелених" тарифів на електричну енергію для приватних домогосподарств [Електронний ресурс] // НКРЕКП. Режим доступу до сервера: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vstanovlennya-zelenikh-tarifiv-na-elektrichnu-energiyu-dlya-privatnikh-domogospodarstv-16> (дата звернення: 18.02.2025).
8. СОУ НЕК 341.001:2019. Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України. Київ : ДП «НЕК «Укренерго», 2019. 43 с.

9. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила (у редакції наказу 2019р.). Київ : Індустрія, 2017. 575 с. (Національний стандарт України).

10. Будівельна кліматологія : ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010. – [Дата введення 2011-11-01]. – К. : Укрархбудінформ, 2011. 123 с. (Національний стандарт України).

11. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : УкрНДПІ сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського, 2006. 75 с.

12. Будівництво у сейсмічних районах України : ДБН В.1.1-12:2006. – К. : Мінбуд України, 2006. 84 с. (Національний стандарт України).

13. Datasheet Інвертора SUN2000-50KTL-M3 [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: <https://solar.huawei.com/en-GB/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fattachment%2Fpdf%2Feu%2Fdatasheet%2FSUN2000-50kTL-M3-Datasheet.pdf> (дата звернення: 20.01.2025).

14. Datasheet Інвертора SUN2000-100KTL-M3 [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: <https://solar.huawei.com/-/media/Solar/attachment/pdf/au/datasheet/SUN2000-100KTL-M1.pdf> (дата звернення: 20.01.2025).

15. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/3174/1/3411p.pdf> (дата звернення: 25.01.2025).

16. ДСТУ EN 50583:2017. Фотоелектричні модулі, інтегровані в будівлі. Частина 1: Фотоелектричні модулі. Частина 2: Фотоелектричні системи. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017.

17. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Правила улаштування електроустановок. 6-е вид. Харків : Індустрія, 2017. 800 с.

18. Evaluation of solar PV panel performance under humid atmosphere [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320366591>

звернення: 25.01.2025).

19. Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: <https://iea-pvps.org/key-topics/soiling-losses-impact-on-the-performance-of-photovoltaic-power-plants/> (дата звернення: 17.02.2025).

20. Impact of environmental factors on photovoltaic system performance degradation [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X25000458> (дата звернення: 10.01.2025).

21. Experimental and economic analysis of passive cooling PV module using fins and planar reflector [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: <https://doaj.org/article/fe5a3f8557604392a7163631b9bf948e> (дата звернення: 17.02.2025).

22. Державні будівельні норми України ДБН А.3.2-2:2009. Охорона праці та промислова безпека у будівництві [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: <https://dbn.com.ua/A.3.2-2-2009> (дата звернення: 20.01.2025).

23. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сервера: <https://dstu.gov.ua/ISO45001-2019> (дата звернення: 20.01.2025).

24. PV-Cable Installation Guidelines [Електронний ресурс] // Energy Library Tesla. Режим доступу до сервера: <https://energylibrary.tesla.com/pv-cable-guidelines> (дата звернення: 07.02.2025).

25. Selection and Use of Insulating Protective Equipment [Електронний ресурс] // OSHA. Режим доступу до сервера: <https://www.osha.gov/insulating-protective-equipment> (дата звернення: 20.01.2025).

26. ДСТУ HD 60364-7-712:2022. Електроустановки низької напруги. Частина 7-712. Фотоелектричні (PV) системи [Електронний ресурс]. Режим доступу до

сервера: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104701 (дата звернення: 20.01.2025).

27. ДСТУ EN IEC 61215-1-1:2022. Наземні фотоелектричні (PV) модулі. Частина 1-1. Випробування кристалічних кремнієвих модулів [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105110 (дата звернення: 20.01. 2025).

28. ДСТУ EN 62446-1:2022. Фотоелектричні (PV) системи. Частина 1. Системи, підключені до мережі [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105009 (дата звернення: 20.01. 2025).

29. ДСТУ EN 50575:2018. Кабелі силові, контрольні та зв'язку. Вимоги щодо реакції на вогонь [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81656 (дата звернення: 20.01. 2025).

30. НПАОП 0.00-1.15-07. Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: https://dnaop.com/html/1582/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00-1.15-07 (дата звернення: 20.01. 2025).

31. ДСТУ EN 50618:2018. Кабелі електричні для фотоелектричних систем [Електронний ресурс]. Режим доступу до сервера: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=79241 (дата звернення: 07.02.2025).

32. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів : затв. наказом Міненерго України № 32 від 25.07.2006, із змінами. Київ : Індустрія, 2017. 300 с.

33. ДБН А.3.2-2:2009. Система стандартів безпеки праці. Основні положення. Режим доступу до сервера: <https://tehnadzor.cc/pages/dbn-a-3-2-2-2009-systema-standartiv-bezpeky-praci-ohorona-pr>

[aci-i-promyslova-bezpeka-u-budivnyctvi-osnovni-polojennya.php](#) (дата звернення: 20.01.2025).

34. Efficiency and sustainability in solar photovoltaic systems: a review of key factors and innovative technologies // MDPI. Режим доступу до сервера: <https://www.mdpi.com/2673-4117/6/3/50> (дата звернення: 20.01.2025).