

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В.о. завідувача кафедри
Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження параметрів електротехнологічного комплексу виробництва електричної енергії сонячними панелями в умовах Сумського національного аграрного університету»

Виконав

_____ (підпис)

Віталій МОРГУН
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

ЕТЕС 2401-1 М

Науковий керівник:

_____ (підпис)

Ганна БАРСУКОВА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

_____ (підпис)

Олена ДОВЖИК
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет **інженерно-технологічний**

Кафедра **енергетики та електротехнічних систем**

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
енергетики та електротехнічних систем

Андрій ЧЕПЖНИЙ

«06» листопада 2024 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу
Віталію МОРГУНУ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження параметрів електротехнологічного комплексу виробництва електричної енергії сонячними панелями в умовах Сумського національного аграрного університету

2. Керівник кваліфікаційної роботи: Барсукова Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент

3. Строк подання здобувачем роботи: «30» січня 2026 року

4. Вихідні дані до роботи: паспортні дані геліосистем, правила улаштування електроустановок, правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти, характеристики електроенергетичного устаткування, методичні рекомендації до виконання проекту (роботи)

5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; Розділ 1. Огляд літератури; Розділ 2. Об'єкт та методи дослідження; Розділ 3. Проектування системи виробництва електричної енергії сонячними електростанціями; Розділ 4. Охорона праці; Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування; Розділ 6. Охорона навколишнього середовища; Висновки; Список використаних джерел

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

_____ (підпис)

Ганна БАРСУКОВА

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

Віталій МОРГУН

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «06» листопада 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 08.09.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 22.09.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 29.09.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. Огляд літератури»	до 13.10.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Об'єкт та методи дослідження»	до 03.10.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Проектування системи виробництва електричної енергії сонячними електростанціями»	до 03.11.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	до 17.11.2025 р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування»	до 01.12.2025 р.	
10.	Підготовка розділу «Розділ 6. Охорона навколишнього середовища»	до 08.12.2025 р.	
11.	Написання висновків та пропозицій	до 15.12.2025 р.	
12.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 25.01.2026 р.	
13.	Подання роботи на рецензування	до 22.01.2026 р.	
14.	Подання до попереднього захисту	до 29.01.2026 р.	

Керівник роботи:

(підпис)

Ганна БАРСУКОВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

(підпис)

Віталій МОРГУН

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Моргун Віталій, «Дослідження параметрів електротехнологічного комплексу виробництва електричної енергії сонячними панелями в умовах Сумського національного аграрного університету».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Сумський національний аграрний університет, Суми, 2026.

Метою даної роботи є дослідження параметрів роботи гібридної сонячної фотоелектричної станції з метою забезпечення електричною енергією споживачів та підвищення енергоефективності системи електропостачання.

У даній роботі запропоновано розглянути актуальні проблемні питання забезпечення споживачів електричною енергією в умовах зростання тарифів, дефіциту традиційних енергоресурсів та необхідності зменшення негативного впливу енергетики на навколишнє середовище. Альтернативна енергетика, зокрема сонячна, надає можливість часткового або повного покриття електроспоживання за рахунок відновлюваних джерел енергії.

З урахуванням сучасних умов розвитку енергетичної галузі України та необхідності підвищення енергетичної незалежності доцільним є аналіз існуючих технічних рішень побудови гібридних сонячних електростанцій, а також особливостей їх роботи в різних режимах з використанням систем накопичення енергії.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати сучасний стан і перспективи розвитку сонячної енергетики;
- дослідити принцип роботи та склад основних елементів гібридної сонячної фотоелектричної станції;

- визначити параметри виробництва електричної енергії сонячною електростанцією;

- виконати розрахунки для конкретного об'єкта електропостачання;
- зробити висновки щодо ефективності використання гібридної сонячної електростанції в реальних умовах експлуатації.

Розрахунки в роботі виконано для конкретного об'єкта споживання електричної енергії. У роботі також розглянуто можливість використання гібридної сонячної фотоелектричної станції для забезпечення електроенергією інших споживачів, що знаходяться поблизу досліджуваного об'єкта.

Варто підкреслити позитивні аспекти використання сонячної енергетики, які полягають у зменшенні споживання електричної енергії з централізованої мережі, скороченні викидів шкідливих речовин в атмосферу та підвищенні надійності електропостачання.

У роботі досліджено:

- актуальність використання відновлюваних джерел енергії;
- особливості функціонування гібридних сонячних фотоелектричних систем;
- технічні характеристики сонячних модулів, інверторного обладнання та акумуляторних батарей;
- режими роботи гібридної сонячної електростанції та їх вплив на ефективність виробництва електричної енергії.

Ключові слова: сонячна електростанція, гібридна СЕС, фотоелектричні модулі, інвертор, акумуляторна батарея, електрична енергія, відновлювана енергетика.

ABSTRACT

Morhun Vitalii, «Research on the parameters of the electrotechnological complex for the production of electric energy by solar panels in the conditions of Sumy National Agrarian University».

Qualification work for obtaining a master's degree in the educational program «Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics» in specialty 141 «Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics», Sumy National Agrarian University, Sumy, 2026.

The purpose of this work is to study the operating parameters of a hybrid solar photovoltaic power plant in order to supply consumers with electrical energy and increase the energy efficiency of the power supply system.

This work considers topical issues of electricity supply under conditions of rising energy tariffs, depletion of traditional energy resources and the need to reduce the negative impact of the energy sector on the environment. Solar energy, as a renewable energy source, makes it possible to partially or fully cover electricity consumption using hybrid photovoltaic systems.

Taking into account current trends in the development of the energy sector of Ukraine and the need to increase energy independence, it is advisable to analyze existing technical solutions for the construction of hybrid solar power plants and the features of their operation in various modes using energy storage systems.

To achieve this goal, the following tasks are envisaged:

- to analyze the current state and prospects of solar energy development;
- to study the operating principle and structure of a hybrid solar photovoltaic power plant;
- to determine the parameters of electrical energy production;
- to perform calculations for a specific power supply object;

- to draw conclusions regarding the efficiency of using a hybrid solar power plant under real operating conditions.

The calculations in the work were carried out for a specific electricity consumer. The possibility of using a hybrid solar photovoltaic power plant to supply electricity to other nearby consumers is also considered.

The positive aspects of using solar energy are emphasized, including the reduction of electricity consumption from the centralized grid, a decrease in harmful emissions and an increase in the reliability of power supply.

The work investigates:

- the relevance of renewable energy sources;
- operating features of hybrid solar photovoltaic systems;
- technical characteristics of solar modules, inverters and battery storage systems;
- operating modes of hybrid solar power plants and their impact on energy production efficiency.

Keywords: solar power plant, hybrid PV system, photovoltaic modules, inverter, battery storage, electrical energy, renewable energy.

ЗМІСТ

Вступ	10
Розділ 1. Огляд літератури та сучасний стан сонячної енергетики	12
1.1. Сучасний стан розвитку сонячної енергетики	12
1.2. Класифікація та особливості фотоелектричних систем	13
1.3. Фотоелектричні модулі: технології, характеристики та перспективи	15
1.4. Інвертори та системи накопичення енергії	16
1.5. Нормативна база, стандарти та дослідження ефективності СЕС	17
1.6. Висновки до розділу 1	18
Розділ 2. Об'єкт і методи дослідження	19
2.1. Технічна характеристика гібридної сонячної електростанції	19
2.2. Схема та принцип роботи гібридної СЕС	24
2.3. Системи управління гібридною СЕС	25
2.4. Методика вимірювань параметрів роботи СЕС	27
2.5. Обробка результатів вимірювань та оцінка похибок	29
2.6. Кліматичні особливості м. Суми	32
2.7. Висновки до розділу 2	34
Розділ 3. Проектування системи виробництва електричної енергії сонячними електростанціями	35
3.1. Вихідні дані для проектування	35
3.2. Варіанти розміщення сонячних модулів	36
3.3. Конструкція кріплення фотоелектричних модулів	39
3.4. Електрична частина проекту	42
3.5. Прогнозована генерація та ефективність системи	46
3.6. Висновки до розділу 3	48

Розділ 4. Охорона праці та безпека при експлуатації гібридної сонячної електростанції	49
4.1. Загальні вимоги охорони праці	49
4.2. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори	49
4.3. Безпека робіт на висоті	50
4.4. Електробезпека при роботі зі змінним струмом	51
4.5. Безпека роботи з постійним струмом	51
4.6. Пожежна безпека	54
4.7. Висновки до розділу 4	54
Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування	57
5.1. Витрати на впровадження сонячної електростанції	57
5.2. Річна генерація та економія електроенергії	57
5.3. Строк окупності проекту	59
5.4. Порівняння з альтернативними джерелами електропостачання	59
5.5. Висновки до розділу 5	60
Розділ 6. Охорона навколишнього середовища	61
6.1. Загальна характеристика впливу сонячної електростанції на довкілля	61
6.2. Вплив на атмосферне повітря та скорочення викидів CO ₂	61
6.3. Екологічна ефективність впровадження сонячної електростанції	63
6.4. Вплив на акустичне середовище (рівень шуму)	63
6.5. Екологічні аспекти використання LiFePO ₄ -акумуляторів	63
6.6. Утилізація фотоелектричних модулів	64
6.7. Висновки до розділу 6	67
Висновки	68
Список використаних джерел	70

ВСТУП

Актуальність теми. Глобальна трансформація енергетики зумовлює прискорене запровадження відновлюваних джерел, серед яких сонячна фотоелектрична генерація посідає провідне місце завдяки швидкому зниженню вартості обладнання, масштабованості та модульності рішень. Для підприємств і закладів освіти впровадження СЕС дозволяє зменшити витрати на електроенергію, підвищити енергетичну стійкість, сформувавши приклад сучасної енергоменеджмент-культури та створити навчально-дослідницьку базу. Саме тому комплексний проект, що охоплює вибір обладнання, техніко-економічну оцінку, питання охорони праці та впливу на довкілля, є актуальним і практично значущим.

Мета роботи полягає у розробленні та обґрунтуванні проектних рішень для фотоелектричної системи з накопиченням енергії, призначеної для покриття власного споживання об'єкта, із забезпеченням вимог безпеки, екологічності та економічної ефективності.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі *завдання*:

- проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку фотоелектричних технологій та ринку обладнання;
- обґрунтувати вибір типу системи (мережева/гібридна), інверторного обладнання й акумуляторів за технічними та експлуатаційними критеріями;
- виконати базові розрахунки енергетичного балансу та розмірності основних компонентів;
- сформувавши вимоги й рішення з електробезпеки, пожежної безпеки, робіт на висоті, санітарії та мікроклімату;
- провести економічну оцінку, розрахувати річну економію, строк окупності та аналіз чутливості;
- оцінити екологічні ефекти (уникнені викиди CO₂), організацію роботи з відходами та заходи запобігання впливам.

Об'єкт дослідження – процес проєктування та експлуатації сонячної фотоелектричної системи з накопиченням енергії для забезпечення власних потреб споживача.

Предмет дослідження – технічні, організаційні, економічні та екологічні рішення, що визначають ефективність і безпечність функціонування СЕС на конкретному об'єкті.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи системного аналізу й енергетичного моделювання, порівняльний аналіз технічних характеристик обладнання, методики оцінювання ризиків (HAZID/JSA), методи інженерної економіки (DCF-аналіз, NPV, IRR, аналіз чутливості), а також принципи екологічного менеджменту для обліку відходів і мінімізації впливів.

Наукова новизна та практична значущість полягають у комплексній інтеграції технічних рішень, організаційних процедур безпеки (ЛОТО, наряди-допуски), економічних розрахунків і заходів екологічної відповідальності в єдиній методиці прийняття рішень для малих та середніх дахових СЕС. Запропонований підхід дозволяє адаптувати проєкт до змін зовнішніх умов (тарифів, режимів споживання, обмежень мережі) та масштабувати рішення.

Очікувані результати впровадження – підвищення частки власного споживання, зниження витрат на електроенергію, скорочення викидів парникових газів, а також покращення надійності енергопостачання. Додатковою цінністю є формування бази для навчально-дослідної роботи, моніторингу та подальшої оптимізації.

Структура роботи. Дипломна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку джерел і додатків. У розділі 1 наведено огляд літератури та ринку технологій; у розділі 2 – технічні рішення та системи керування; у розділі 3 – розрахунки та моделювання; у розділі 4 – охорона праці та безпека; у розділі 5 – економічна оцінка; у розділі 6 – охорона навколишнього середовища.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Сучасний стан розвитку сонячної енергетики

Сонячна енергетика є ключовим чинником переходу до відновлюваної економіки [1]. Світова динаміка демонструє стрімке зростання потужностей СЕС, зниження собівартості генерації та активне впровадження новітніх технологій [12]. За даними IRENA (2024), світова потужність СЕС перевищила 1,5 ТВт проти 40 ГВт у 2010 році. Середньорічний приріст складає понад 20 % [11]. В Україні у 2015 році було встановлено близько 1 ГВт, у 2020 – понад 6 ГВт, а у 2024 році – вже більше 8 ГВт (рис. 1.1) [12]. Вартість LCOE сонячної електроенергії знизилася у 10 разів між 2010 та 2024 роками (рис. 1.2) [23]. В ЄС ціна модуля складає 0,18–0,22 €/Вт, в Україні – 0,09–0,1 €/Вт (табл. 1.1) [16, 12].

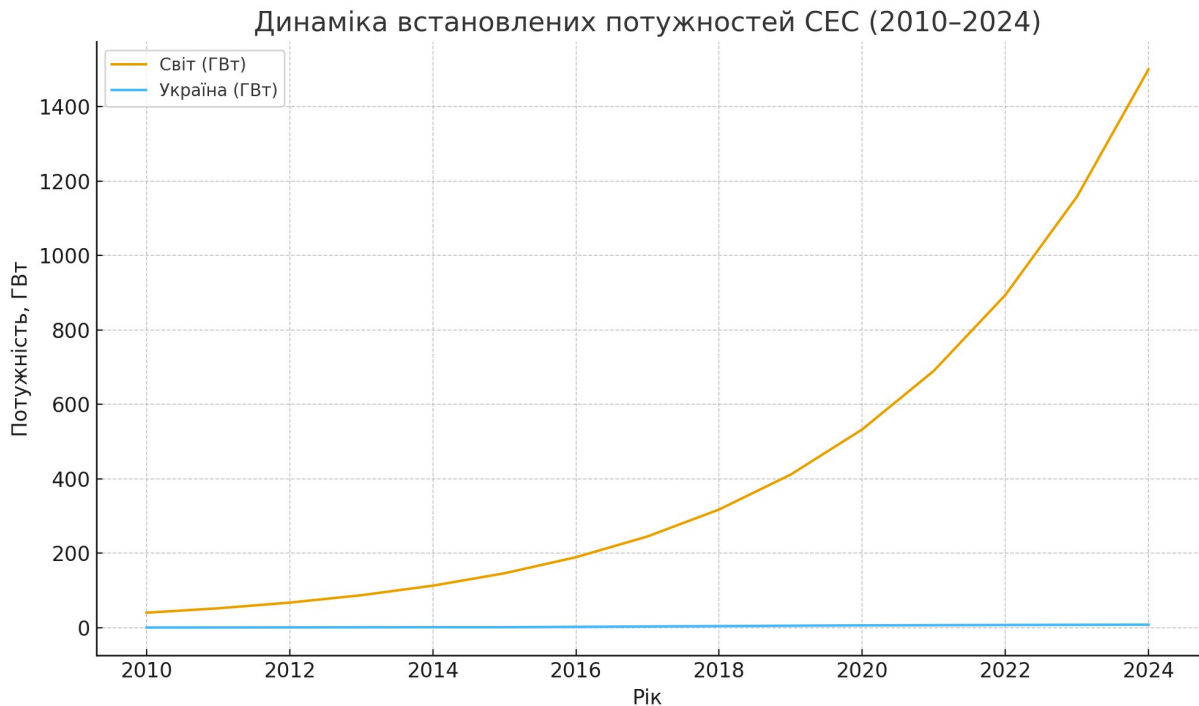


Рисунок 1.1 – Динаміка встановлених потужностей СЕС у світі та в Україні (2010–2024) [11, 12]

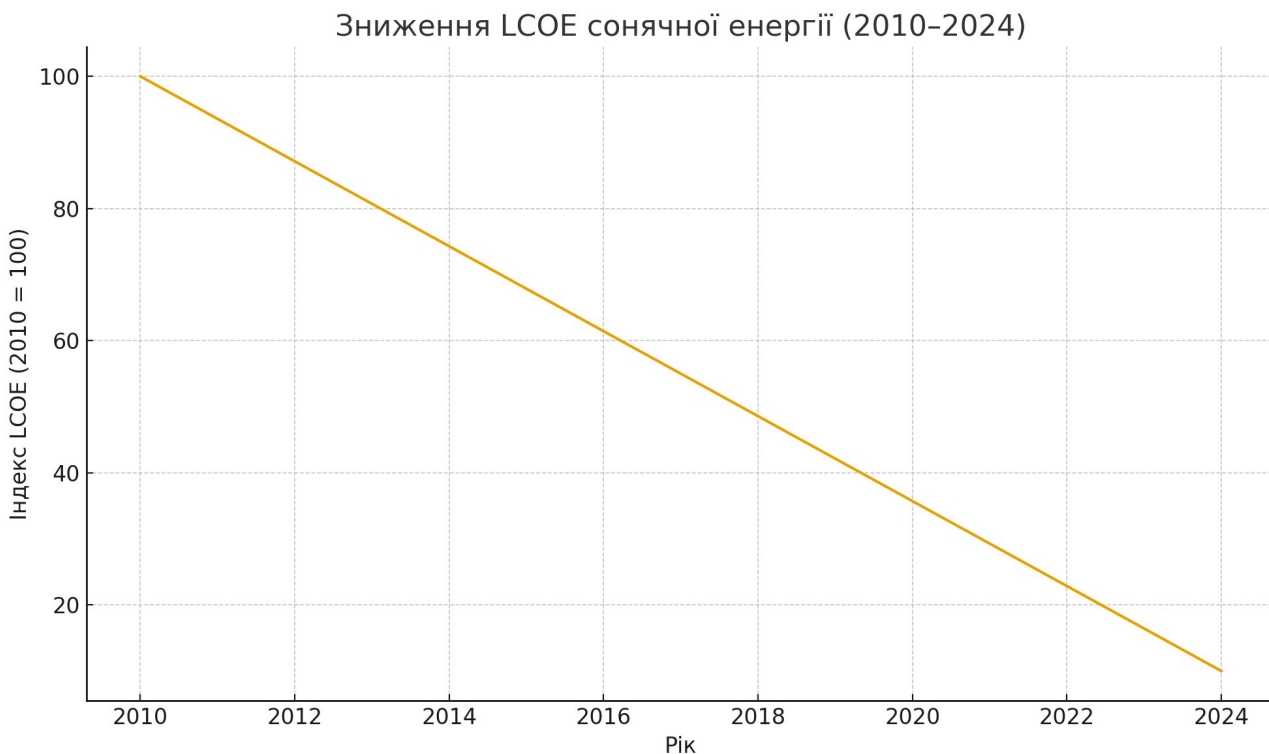


Рисунок 1.2 – Зниження LCOE сонячної енергії (2010–2024) [23]

Таблиця 1.1 – Порівняння ринку СЕС в Україні та ЄС [12, 23]

Критерій	Україна	ЄС
Ціна модуля	0,09–0,10 €/Вт	0,18–0,22 €/Вт
Субсидії	Мінімальні	Значні програми
Тариф/вартість е/е	≈9 грн/кВт·год	0,25–0,30 €/кВт·год
Домінуючий сегмент	Домогосподарства, малі СЕС	Комерційні/промислові

1.2 Класифікація та особливості фотоелектричних систем

За принципом роботи розрізняють три основні типи СЕС: мережеві (on-grid), автономні (off-grid) та гібридні (hybrid) [13, 14]. Мережеві рішення простіші та дешевші, але залежать від параметрів електромережі [13]. Автономні забезпечують енергетичну незалежність, однак потребують значних інвестицій

у накопичувачі [14]. Гібридні поєднують переваги обох підходів (табл. 1.2) [15]. Для навчальних і дослідницьких цілей особливо актуальні дахові та кампусні СЕС, що дозволяють поєднати практичну генерацію з освітнім процесом (рис. 1.3) [25].

Таблиця 1.2 – Порівняння типів фотоелектричних систем [13-15]

Тип СЕС	Наявність АКБ	Залежність від мережі	Вартість	Надійність
On-grid	Ні	Висока	Низька	Середня
Off-grid	Так	Низька	Висока	Висока
Hybrid	Так	Середня	Вища	Дуже висока

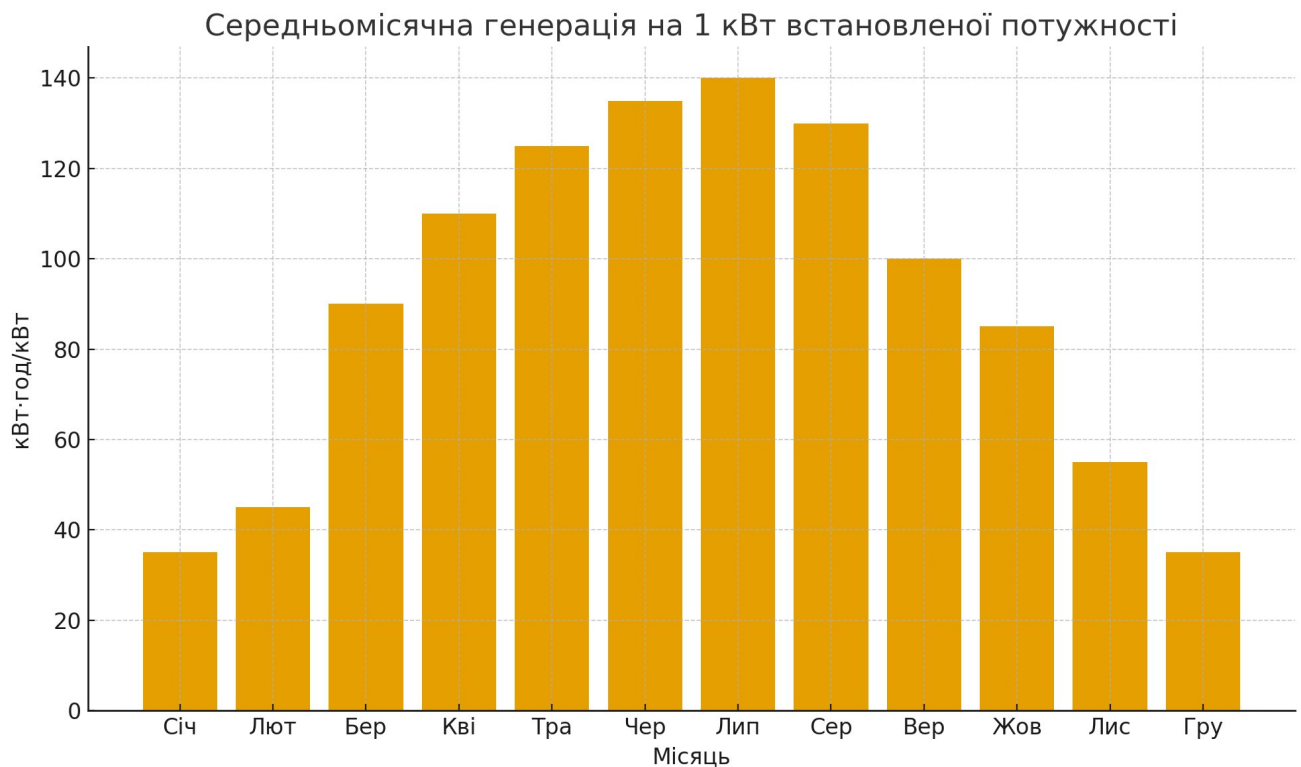


Рисунок 1.3 – Сезонний профіль генерації в Україні [21]

1.3 Фотоелектричні модулі: технології, характеристики та перспективи

Основними типами сонячних модулів є монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові [13, 15]. Монокристалічні мають найвищий ККД (20–22 %) та строк служби 25–30 років. Полікристалічні дешевші, але їхня ефективність нижча (15–18 %). Тонкоплівкові відзначаються легкістю та гнучкістю, проте ККД складає лише 10–15 % (табл. 1.3) [15]. Сучасні розробки включають bifacial-модулі, технології TOPCon і HJT з ККД понад 25 %, а також перовськіти (до 30 % у лабораторних умовах) [12, 15]. Набирають популярності BIPV-рішення, які інтегрують модулі у будівельні конструкції, та half-cut елементи, що зменшують втрати від затінення [16].

Таблиця 1.3 – Характеристики основних типів модулів [15, 16]

Тип модуля	ККД, %	Термін служби, років	Переваги	Недоліки
Монокристалічні	20–22	25–30	Високий ККД	Вища ціна
Полікристалічні	15–18	20–25	Нижча ціна	Менша ефективність
Тонкоплівкові	10–15	15–20	Легкі, гнучкі	Нижчий ККД

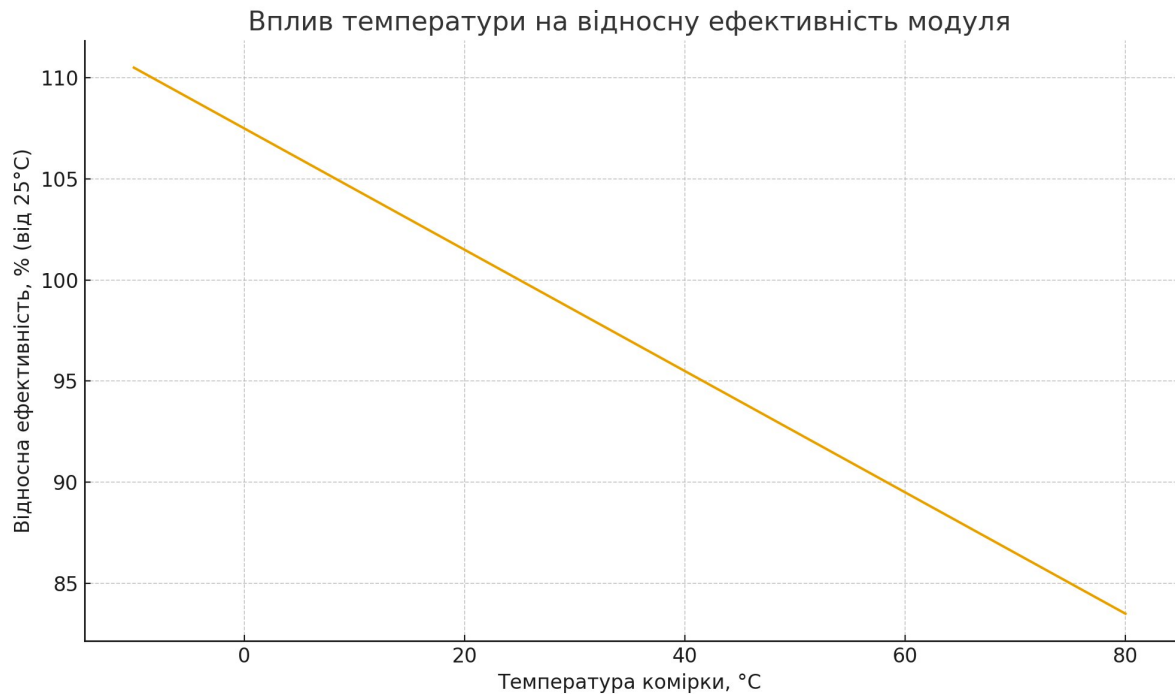


Рисунок 1.4 – Вплив температури на ефективність модуля (коеф. $-0,3 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ від $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [15]

1.4 Інвертори та системи накопичення енергії

Інвертори виконують ключові функції: перетворення постійного струму на змінний, синхронізацію з мережею, моніторинг, управління АКБ та захист обладнання [14, 17]. Виділяють центральні, стрінгові та мікроінвертори [14]. Стрінгові забезпечують оптимальне співвідношення ціни та ефективності, а мікроінвертори підвищують надійність у дахових СЕС [14]. Системи накопичення є основою автономних і гібридних рішень [18]. Свинцево-кислотні АКБ мають 500–800 циклів, AGM/GEL – до 1200 циклів, а LiFePO_4 – понад 6000 циклів і до 15 років служби (рис. 1.5) [18, 24]. Вартість зберігання електроенергії у LiFePO_4 знизилася з 1000 дол./кВт·год у 2010 році до менш ніж 150 дол./кВт·год у 2024 році [24].

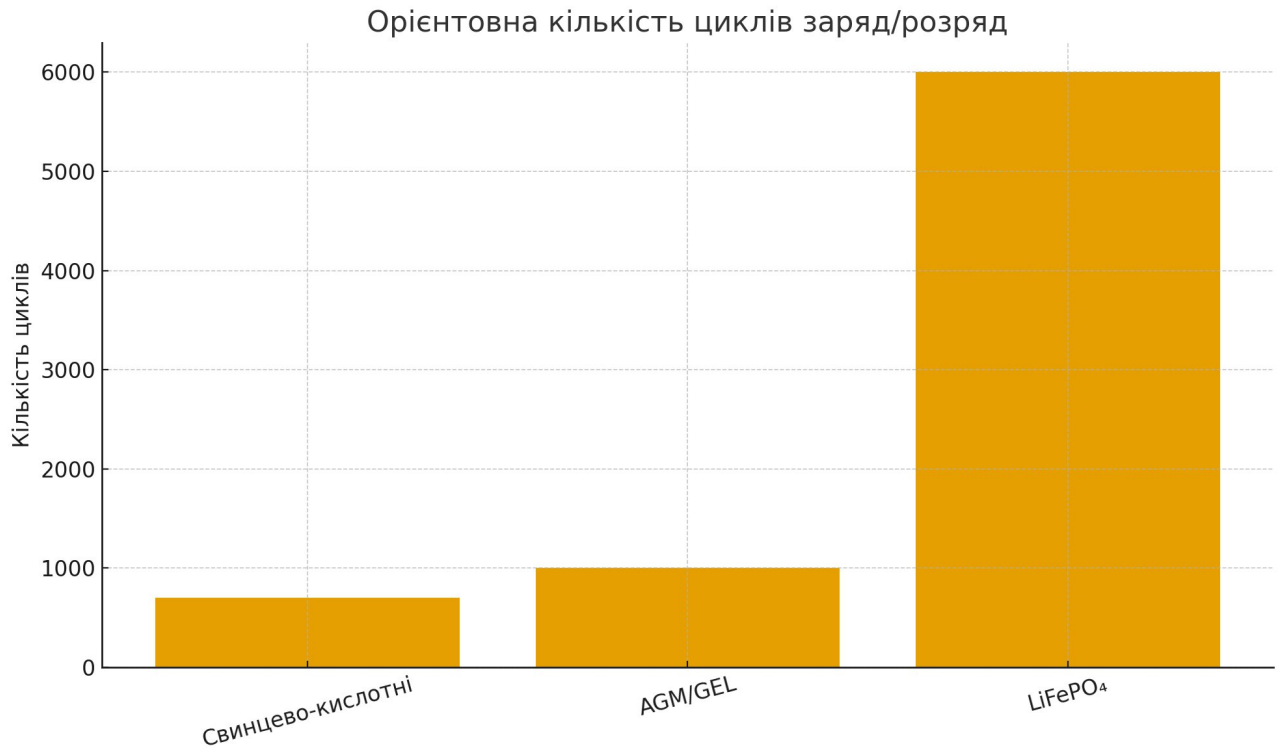


Рисунок 1.5 – Порівняння ресурсу різних типів АКБ [18, 24]

1.5 Нормативна база, стандарти та дослідження ефективності СЕС

Сонячні модулі сертифікуються за IEC 61215, IEC 61730, IEC 61701 [7-9]. Інвертори повинні відповідати EN50549, VDE-AR-N-4105, UL1741 [10]. В Україні діють ПУЕ та ДСТУ EN 50583, які регламентують інтеграцію СЕС у будівлі [3,6]. Дослідження показують, що оптимальний кут нахилу для центральної України становить 30–35°, а ефективність залежить від систем моніторингу та регулярного очищення панелей [21, 25]. Міжнародний досвід університетів (Stanford, ETH Zurich, NTU Singapore) доводить, що впровадження дахових СЕС у кампусах дозволяє поєднати навчальний процес із реальною генерацією електроенергії [25].

1.6 Висновки до розділу 1

Огляд літератури підтвердив стратегічну важливість сонячної енергетики у світовому та українському енергетичному балансі [11, 12]. Розвиток СЕС характеризується швидким зростанням потужностей, здешевленням технологій та впровадженням інноваційних рішень [23, 24]. Фотоелектричні системи класифікуються на мережеві, автономні та гібридні, кожна з яких має свої переваги й обмеження [13, 15]. Сучасні модулі (TOPCon, HJT, перовськіти, bifacial) забезпечують підвищення ККД та довговічності. Інвертори та системи накопичення відіграють вирішальну роль у забезпеченні стабільної роботи СЕС [15, 18]. Важливим є дотримання міжнародних і національних стандартів (IEC, EN, ДСТУ), що дозволяє інтегрувати український ринок у європейський простір [3, 6-10]. Для освітніх закладів і кампусів найбільш перспективними є дахові та гібридні рішення, що поєднують генерацію електроенергії та навчальний ефект.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Технічна характеристика

У даній дипломній роботі об'єктом дослідження є дахова сонячна електростанція гібридного типу, яка поєднує функції генерації електроенергії від фотоелектричних модулів, накопичення енергії у літій-залізо-фосфатних акумуляторних батареях та синхронізованої роботи з електричною мережею [13, 14]. Станція спроектована для забезпечення потреб навчального закладу, що передбачає високу надійність, енергоефективність та можливість інтеграції у навчальний процес [25]. Основні технічні характеристики наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики спроектованої СЕС [16-18]

Тип системи	Гібридна дахова сонячна електростанція
Сонячні панелі	112 шт. Trina Solar Vertex, потужність 620 Вт кожна, сумарно $\approx 69,4$ кВт
Інвертор	Гібридний Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-VM4, потужність 50 кВт
Акумуляторна батарея	24 модулі BOS-GM5.1 LiFePO ₄ по 5,12 кВт·год, сумарна ємність $\approx 122,9$ кВт·год
Призначення	Забезпечення електроживлення об'єкта та дослідження параметрів ВДЕ

Фотоелектричні модулі Trina Solar Vertex **TSM-620NEG20C.20** (рис. 2.1) з номінальною потужністю 620 Вт кожен належать до категорії високоефективних монокристалічних модулів на основі технології N-type TOPCon [16]. Вони характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії – до 21,9 %, подвійним склом та можливістю двосторонньої генерації, що забезпечує додатково до +30 % виробітку. Габаритні розміри модуля – близько

2172×1303×30 мм, маса – 33,9 кг. Робоча напруга – близько 44 В, робочий струм – 14,1 А, температура експлуатації від –40 до +85 °С [16].



Рисунок 2.1 – Фотомодуль Trina Solar Vertex TSM-620NEG20C.20 [16]

Інвертор Deye **SUN-50K-SG01HP3-EU-VM4** є трифазним гібридним пристроєм потужністю 50 кВт (рис. 2.2) [17]. Він оснащений 4 незалежними MPPT-трекерами, що дозволяє ефективно працювати з декількома масивами панелей, забезпечує ККД перетворення до 98,5 %, має клас захисту IP65 та

підтримує паралельну роботу до 16 інверторів. Даний інвертор інтегрується з високовольтними акумуляторами, підтримує функції моніторингу та дистанційного керування [17].

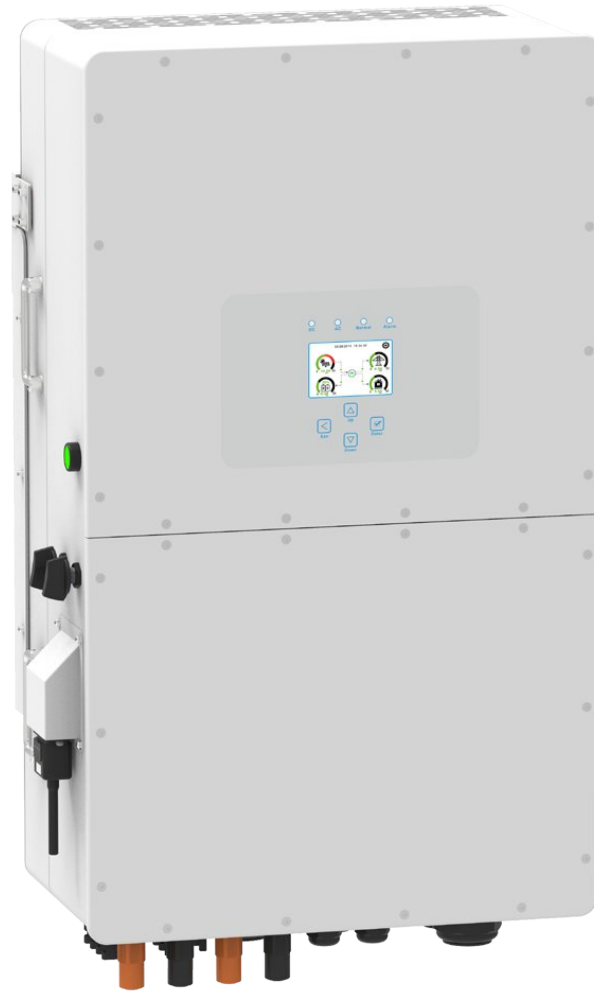


Рисунок 2.2 – Гібридний інвертор SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 [17]

Акумуляторна система **BOS-G LiFePO₄** (рис 2.3) складається з 24 модулів **Deye BOS-G PRO LiFePO₄ HV** ємністю 5,12 кВт·год кожен (рис. 2.4) [18]. Загальна ємність батарейної шафи становить $\approx 122,9$ кВт·год, що дозволяє забезпечити роботу об'єкта у разі відсутності зовнішнього електропостачання. Використання літій-залізо-фосфатної технології гарантує високу безпеку, понад 6000 циклів заряд/розряд та строк служби більше 15 років [18, 24].



Рисунок 2.3 – Система зберігання енергії Deye BOS-G [18]



Рисунок 2.4 - Deye BOS-G PRO LiFePO4 HV (5.12 kW/h) [18]

Таким чином, запропонована конфігурація обладнання забезпечує збалансоване поєднання високої ефективності, тривалого ресурсу та гнучкості у використанні [14, 25]. Обрана система дозволяє накопичувати та використовувати енергію у пікові години, забезпечувати безперебійне живлення критично важливих споживачів та виконувати дослідницькі завдання у навчальних умовах [25].

2.2 Схема та принцип роботи

Сучасні гібридні сонячні електростанції оснащуються інтегрованими системами управління, що виконують ключові функції оптимізації роботи комплексу [17].

Основні завдання таких систем:

- Керування потоками енергії – визначення пріоритетів між живленням навантаження, зарядом акумуляторів та віддачею надлишків у мережу [14].

- Захист обладнання – автоматичне відключення у випадку перевантажень, коротких замикань чи аномалій у мережі [3, 4].

- Балансування роботи з мережею – підтримка стабільної напруги та частоти, синхронізація генерації з зовнішньою енергосистемою [10].

- Моніторинг та діагностика – збір даних про напругу, струм, температуру обладнання та стан АКБ з подальшим аналізом у реальному часі [9, 20].

- Інтелектуальне управління – застосування алгоритмів для прогнозування генерації та адаптації роботи СЕС до кліматичних умов і потреб споживача [14].

Структурна схема гібридної сонячної електростанції подана на рисунку 2.5.

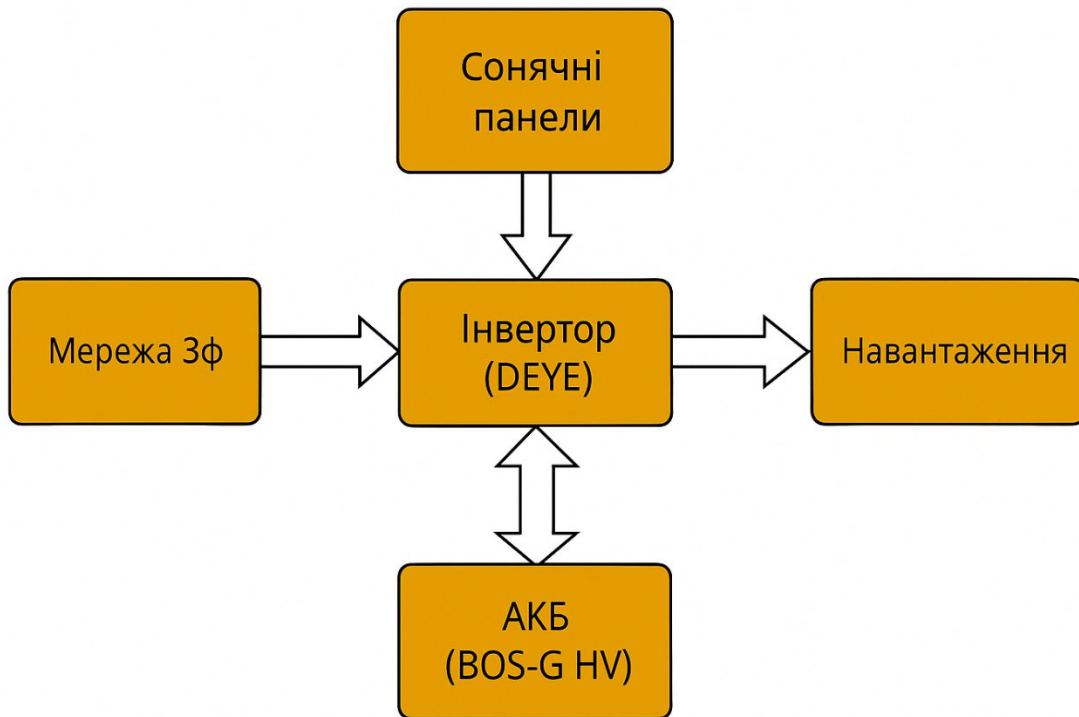


Рисунок 2.5 – Структурна однолінійна схема гібридної СЕС [14, 17]

Завдяки таким системам управління досягається висока ефективність, стабільність та надійність роботи електростанції, а також забезпечується можливість дистанційного контролю й інтеграції у концепцію «розумних мереж» (smart grid) [10, 20].

2.3 Системи управління гібридною СЕС

Гібридна сонячна електростанція поєднує в собі функції генерації електроенергії від сонячних панелей, перетворення струму інвертором та накопичення енергії в акумуляторних батареях [13, 14]. Основними складовими системи є: фотоелектричні модулі, гібридний інвертор, система зберігання енергії та споживачі електричної енергії. Додатково система інтегрована з зовнішньою електромережею, що забезпечує можливість як паралельної роботи, так і резервного живлення [10].

Принцип роботи гібридної сонячної електростанції полягає у наступному [14, 17]:

- У денний час сонячні панелі генерують постійний струм, який подається на інвертор.
- Частина енергії спрямовується на живлення навантажень споживача.
- Надлишок енергії використовується для заряджання акумуляторної батареї.
- У вечірній або нічний час інвертор використовує енергію з АКБ для живлення навантажень.
- За недостатності сонячної генерації або розряджених АКБ споживач отримує електроенергію із зовнішньої мережі.
- У випадку аварійного відключення зовнішньої мережі система переходить у режим автономної роботи.

Режими роботи системи зведені у таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні режими роботи гібридної СЕС [14]

Режим	Джерело живлення	Особливості роботи
Денний	Сонячні панелі	Генерація енергії, живлення споживачів і заряд АКБ
Нічний	АКБ + мережа	Робота від акумуляторів або мережі при їх розряді
Аварійний	АКБ	Забезпечення резервного живлення критичних навантажень

Таким чином, гібридна сонячна електростанція забезпечує гнучкість у роботі з різними джерелами енергії, оптимізує використання сонячної генерації та підвищує надійність електропостачання [13-15]. Поєднання функцій

накопичення та роботи в паралельному режимі з мережею робить її ефективним рішенням для сучасних об'єктів [14].

2.4 Методика вимірювань

Для забезпечення достовірності досліджень у даній роботі застосовується комплексна методика вимірювань, яка охоплює контроль електричних параметрів фотоелектричних модулів, інвертора та акумуляторної системи, а також вимірювання кліматичних умов, що впливають на ефективність роботи СЕС [9].

Засоби вимірювання та їх характеристики подані у таблиці 2.3

Методика вимірювань включає *наступні етапи* [9, 19]:

- Вимірювання напруги та струму на виході сонячних модулів у різних режимах роботи.
- Фіксація вольт-амперних характеристик (ВАХ) панелей із використанням мультиметра та струмовимірювальних кліщів UNI-T UT207B [19].
- Контроль параметрів інвертора (вхідна напруга, струм, вихідна потужність, ККД) [17].
- Вимірювання рівня заряду/розряду акумуляторної батареї за допомогою вбудованої BMS [18].
- Визначення температури поверхні панелей за допомогою пірометра.
- Встановлення кута нахилу сонячних модулів із застосуванням електронного кутоміра.
- Реєстрація кліматичних параметрів (температура навколишнього середовища, рівень сонячної радіації) [21, 22].

Таблиця 2.3 – Засоби вимірювання та їх характеристики [9, 19]

Прилад	Призначення	Основні характеристики
Мультиметр	Вимірювання напруги та струму	Діапазон до 1000 В, 20 А
Струмовимірювальні кліщі UNI-T UT207B	Контроль струму навантаження	АС/DC до 1000 А, точність $\pm 2\%$
Пірометр	Вимірювання температури панелей	Діапазон $-50 \dots +500$ °С, похибка 2%
Електронний кутомір	Визначення кута нахилу модулів	Діапазон $0-90^\circ$, точність $0,1^\circ$
BMS акумулятора	Моніторинг заряду/розряду	До 600 В, інтегрований захист

Застосування комплексної методики вимірювань дозволяє отримати повну картину роботи СЕС у різних умовах, визначити її енергетичну ефективність, виявити вплив кліматичних факторів та оцінити надійність обладнання [9, 25].

2.5 Обробка та похибки

Під час проведення вимірювань у сонячних електричних системах важливо не лише зафіксувати отримані дані, але й правильно їх обробити, враховуючи вплив випадкових та систематичних похибок [13]. Коректна інтерпретація результатів дозволяє підвищити точність оцінки роботи станції та зробити достовірні висновки [14].

Основні етапи обробки результатів вимірювань [13, 14]:

- Первинна перевірка отриманих даних, виявлення явних відхилень або збоїв у показаннях.
- Усереднення результатів багатократних вимірювань для зниження впливу випадкових похибок.
- Побудова вольт-амперних характеристик (ВАХ) сонячних модулів на основі експериментальних даних.
- Визначення точки максимальної потужності (MPP) та порівняння її з паспортними значеннями.
- Розрахунок коефіцієнта корисної дії системи та втрат у елементах (інвертор, АКБ, кабельні лінії).
- Побудова графіків залежності генерації від кліматичних параметрів (температури, інсоляції).

У процесі вимірювань можливі наступні види похибок [13]:

- Систематичні – виникають внаслідок неточності калібрування приладів або методики вимірювань.
- Випадкові – зумовлені флуктуаціями зовнішніх умов (температура, хмарність, вітер).
- Інструментальні – пов'язані з обмеженнями технічних характеристик засобів вимірювань.

- Методичні – виникають у разі неправильного застосування методики або вибору точки вимірювання.

Джерела похибок і методи їх мінімізації наведено у таблиці 2.4, а приклади графічних залежностей показано на рисунках 2.6 і 2.7.

Таблиця 2.4 – Джерела похибок та способи їх мінімізації [13, 14]

Джерело похибки	Спосіб мінімізації
Неточність калібрування приладу	Регулярна повірка та калібрування обладнання
Флуктуації сонячної радіації	Усереднення результатів, проведення вимірювань у стабільних умовах
Температурний вплив на модуль	Використання корекційних коефіцієнтів
Нестабільність контактів у схемі	Забезпечення якісних з'єднань та контроль монтажу

Таким чином, застосування правильної методики обробки даних і врахування джерел похибок дозволяє отримати об'єктивні результати досліджень, які можуть бути використані для аналізу ефективності роботи СЕС та оптимізації її параметрів у реальних умовах [13, 14].

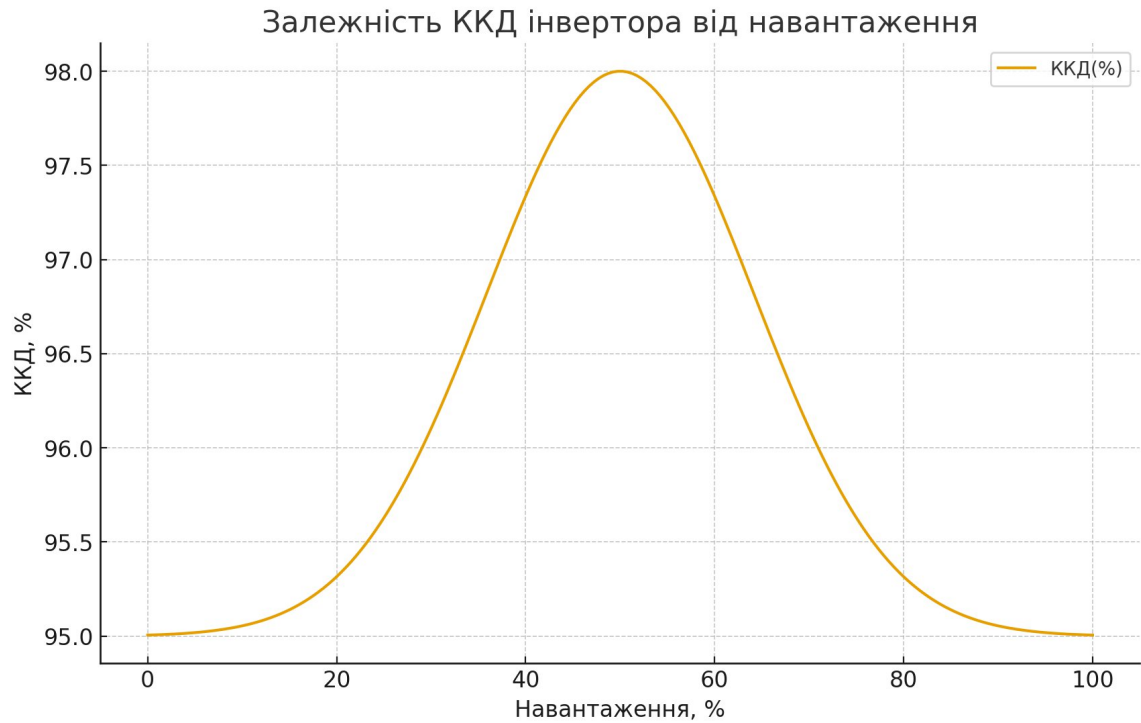


Рисунок 2.6 – ККД інвертора залежно від навантаження [17]

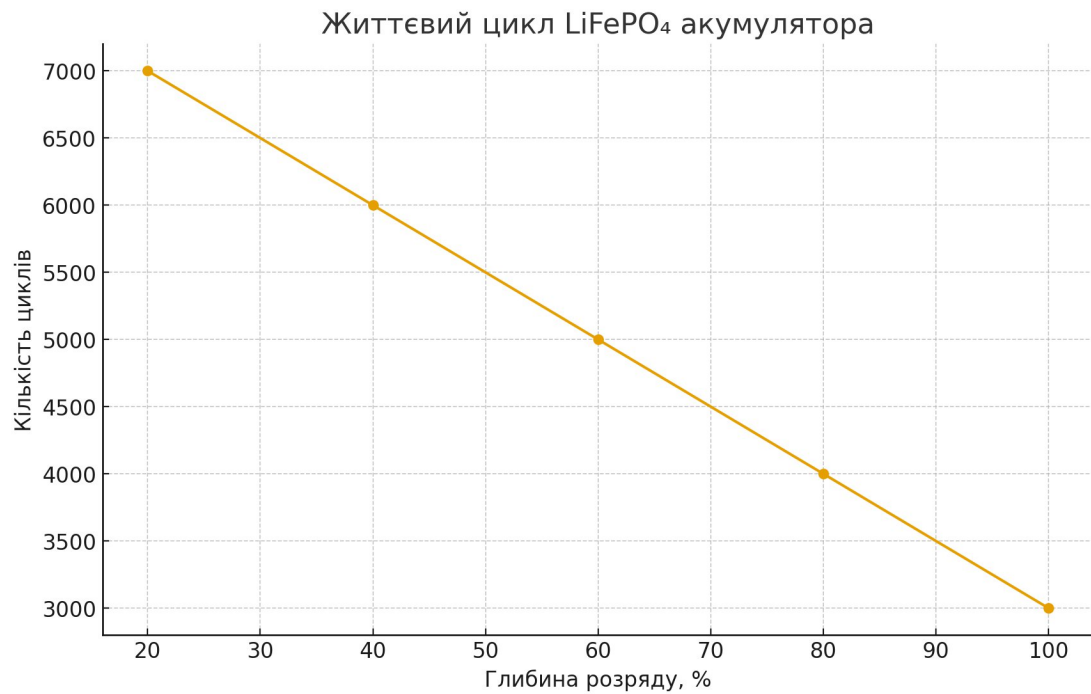


Рисунок 2.7 – Залежність ресурсу LiFePO₄ від глибини розряду (DoD) [18, 24]

2.6 Кліматичні особливості м. Суми

Ефективність роботи сонячних електростанцій значною мірою залежить від кліматичних умов регіону, оскільки рівень сонячної інсоляції, температура повітря та сезонні особливості визначають річний обсяг генерації електроенергії [21, 22]. У даному підрозділі розглядаються кліматичні параметри м. Суми, що мають вирішальний вплив на роботу фотоелектричної системи.

Місто Суми розташоване у північно-східній частині України та характеризується помірно-континентальним кліматом. Зими є холодними зі середньомісячною температурою січня $-6...-7$ °С, а літо тепле зі середньомісячною температурою липня $+19...+20$ °С. Річна кількість сонячних годин становить близько 1800–1900, що створює сприятливі умови для розвитку сонячної енергетики [21].

За даними багаторічних спостережень середньорічна сумарна сонячна радіація у Сумській області становить близько 1200–1250 кВт·год/м² на рік [22]. Найвищі значення спостерігаються у літні місяці (червень–серпень), тоді як найнижчі – у грудні та січні.

Середньомісячна генерація для м. Суми наведена у таблиці 2.5, а графіки розподілу виробітку подано на рисунку 2.8.

Таблиця 2.5 – Середньомісячна сонячна генерація в м. Суми (умовні дані)
[21]

Місяць	Середня генерація, кВт·год/кВт потужності
Січень	30
Лютий	55
Березень	95
Квітень	120
Травень	145

Червень	160
Липень	165
Серпень	150
Вересень	110
Жовтень	80
Листопад	45
Грудень	25

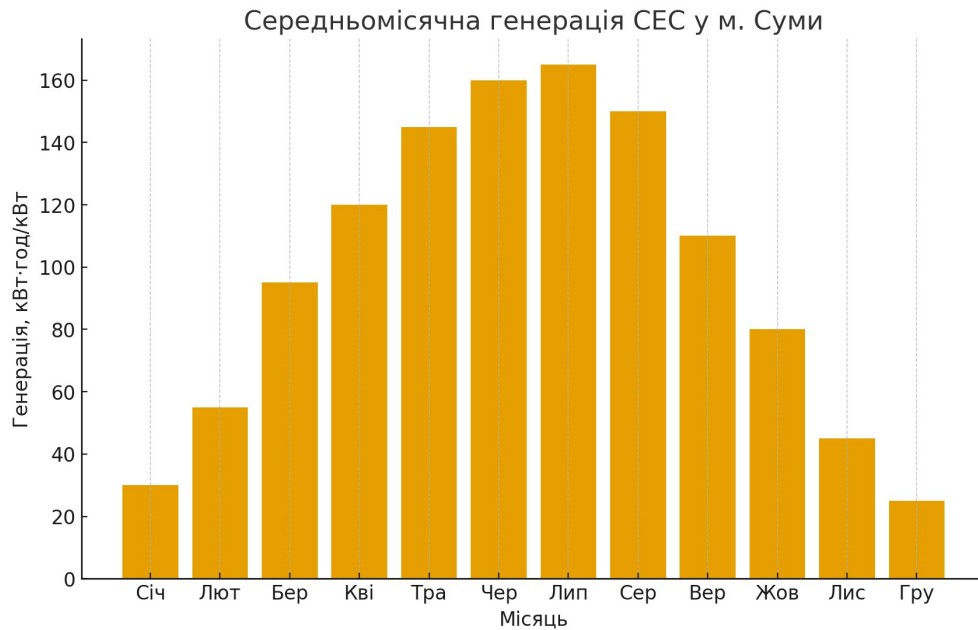


Рисунок 2.8 – Середньомісячна генерація СЕС у м. Суми [21]

Таким чином, кліматичні умови м. Суми є сприятливими для впровадження сонячних фотоелектричних систем. Річний потенціал генерації дозволяє забезпечити стабільну роботу станції, а сезонні коливання можуть бути скомпенсовані використанням систем накопичення енергії та інтеграцією з електромережею [14, 18].

2.7 Висновки до розділу 2

У другому розділі було розглянуто об'єкт дослідження – гібридну дахову сонячну електростанцію, що поєднує сучасні фотоелектричні модулі, інвертор та систему накопичення енергії [14, 17, 18]. Обладнання відрізняється високою ефективністю та надійністю, а його характеристики підтверджують доцільність вибору для навчально-дослідницьких цілей.

Детально проаналізовано принцип функціонування гібридної СЕС, включно з роботою систем управління, які координують енергопотоки, забезпечують захист обладнання та інтеграцію в енергомережу. Це підвищує стабільність та ефективність роботи електростанції.

Розроблена методика вимірювань дозволяє фіксувати параметри роботи модулів, інвертора й акумуляторів, а також кліматичні показники. Запропоновані способи обробки результатів враховують вплив похибок і забезпечують достовірність аналізу [9, 13, 21].

Окремо вивчено кліматичні умови м. Суми, які характеризуються достатнім рівнем інсоляції та річною кількістю сонячних годин, що підтверджує перспективність впровадження сонячних електростанцій у цьому регіоні.

Загалом, проведені дослідження доводять, що обрана конфігурація обладнання, методика вимірювань і система управління забезпечують ефективну роботу сонячної електростанції, роблять її адаптованою до кліматичних особливостей та перспективною для впровадження в навчальні заклади й у практичні енергетичні об'єкти [25].

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

3.1 Вихідні дані для проєктування

Проєктування сонячної електростанції виконується для даху головного корпусу Сумського національного аграрного університету (СНАУ). Будівля має багаторівневу плоску покрівлю зі світловими шахтами, парапетами та технічними виходами. Загальна площа покрівлі становить близько 3000 м², з яких під розміщення фотоелектричних модулів використовується центральна частина орієнтовною площею приблизно 1000–1200 м². Таке компонування забезпечує оптимальні умови інсоляції та зручний доступ для монтажу й обслуговування [21].

Покрівля виконана із залізобетонних плит перекриття з рулонною гідроізоляцією на бітумній основі. Несуча здатність перекриття дозволяє навантаження до 250 кг/м², тому використовується баластна система кріплення без анкерування до плит – що повністю зберігає герметичність даху та спрощує технічне обслуговування [25].

Будівля орієнтована довгою стороною у напрямку схід – захід, що дає змогу розмістити сонячні панелі з орієнтацією на південь під оптимальним кутом нахилу. З урахуванням географічного розташування м. Суми (широта $\approx 50,9^\circ$ пн. ш.) оптимальний кут становить 30–35° [21, 22]. Для запобігання взаємному затіненню рядів при такому куті прийнято міжрядну відстань 8,612 м між осями конструкцій, що підтверджується кресленням плану покрівлі (рис. 3.1) [21]. Така схема забезпечує повне освітлення панелей у зимовий період і дозволяє безперешкодно обслуговувати систему.

Основні фотоелектричні модулі – Trina Solar Vertex TSM-620NEG20C.20 (112 шт.) із сумарною потужністю 69,4 кВт [16]. Модулі встановлюються у 7 паралельних рядах по 16 панелей, орієнтованих на південь. Інверторне

обладнання – Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 потужністю 50 кВт – розміщується у технічному приміщенні безпосередньо під дахом, що зменшує довжину кабельних трас і втрати у ланцюгах постійного струму [17]. Система накопичення енергії – 24 модулі BOS-G PRO LiFePO₄ HV 5,12 кВт·год (загальна ємність $\approx 122,9$ кВт·год) – також розташовується поруч з інвертором у вентильованому приміщенні [18]і.

Живлення системи виконується від трифазної мережі 380 В / 50 Гц з системою заземлення TN-S. Для захисту та контролю передбачено [3, 4, 20]:

- головний автоматичний вимикач на лінії змінного струму;
- пристрій захисного вимкнення (ПЗВ) і комплект запобіжників;
- моніторингову систему Solarman Smart для дистанційного контролю параметрів.

Основні вихідні технічні параметри проєкту:

- тип системи – гібридна дахова сонячна електростанція;
- встановлена потужність – 69,4 кВт;
- тип кріплення – баластна алюмінієва система, кут 30°;
- міжрядна відстань – 8,612 м;
- орієнтація панелей – південь;
- площа зайнятої частини даху – близько 1100 м².

Узгодження цих параметрів дозволяє реалізувати дахову сонячну електростанцію без втручання у несучі конструкції будівлі, забезпечивши високу ефективність роботи, безпечність експлуатації та довговічність конструкцій.

3.2 Варіанти розміщення сонячних модулів

Під час проєктування сонячної електростанції на даху головного корпусу СНАУ було розглянуто декілька можливих варіантів орієнтації фотоелектричних модулів. Мета порівняння — вибір оптимальної конфігурації, що забезпечує

максимальну генерацію електроенергії за річний цикл, з урахуванням кліматичних особливостей м. Суми, геометрії покрівлі та технічних обмежень конструкції [21, 22].

Основними розглянутими варіантами є:

- 1) класичне південне орієнтування під кутом 35° ;
- 2) двостороннє (East–West) орієнтування під кутом $10\text{--}15^\circ$.

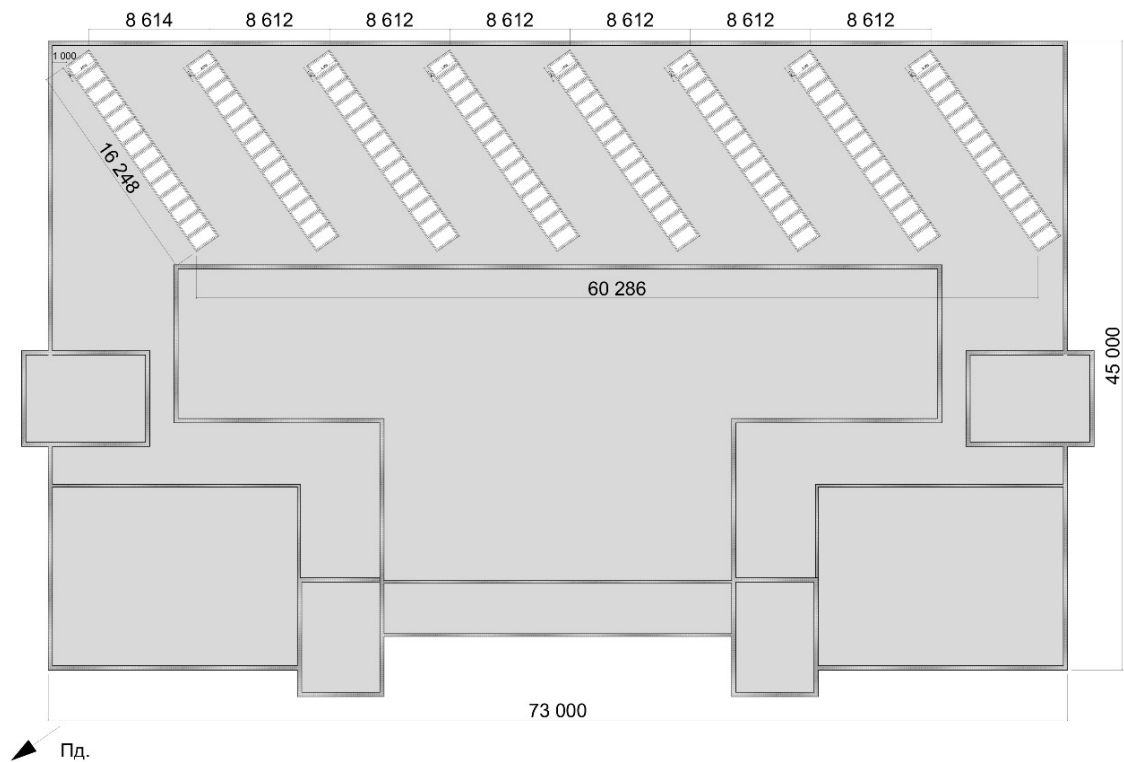


Рисунок 3.1 – План розміщення сонячних панелей на покрівлі головного корпусу СНАУ (2D-схема) [21]

На рисунку 3.1 показано план розміщення сонячних панелей на центральній ділянці покрівлі. Для цього варіанту використовується південна орієнтація модулів, кут нахилу становить 35° , а міжрядна відстань дорівнює 8,612 м. Таке компонування запобігає взаємному затіненню навіть у зимові місяці, коли сонце має найнижче положення над горизонтом [21].

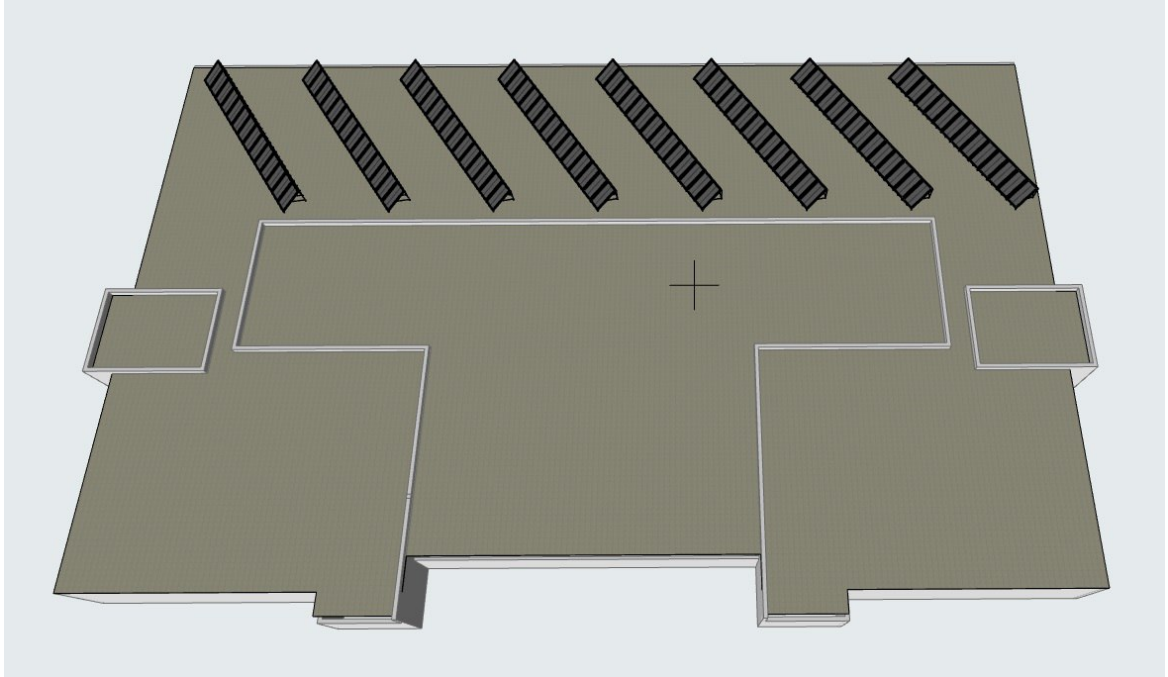


Рисунок 3.2 – Тривимірна візуалізація розміщення сонячних панелей на даху головного корпусу СНАУ [21]

На рисунку 3.2 наведено тривимірну візуалізацію даху з розміщеними панелями. Моделі відображають реальні геометричні пропорції, що дозволяє оцінити освітленість, тіні від парапетів та розташування технічних проходів. Південна орієнтація забезпечує найвищий річний виробіток (до 1150–1200 кВт·год/кВт встановленої потужності), тому обрана як основна для реалізації проєкту [21].

Для порівняння було розглянуто також альтернативний варіант – орієнтацію модулів у системі «схід–захід» із меншим кутом нахилу (10–15°). Таке рішення дозволяє розмістити більше панелей на одиниці площі даху, проте воно знижує пікову генерацію в полуденний час і збільшує рівень затінення у ранкові та вечірні години. Для навчально-дослідного об'єкта така схема не є

переважною, адже основна мета – демонстрація максимально ефективної системи з типовими для регіону параметрами [21].

Порівняльні характеристики наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльна ефективність варіантів орієнтації сонячних модулів [21].

Варіант	Кут нахилу, °	Орієнтація	Очікувана генерація, кВт·год/кВт·рік
1. Південний	30	Південь	1150–1200
2. Схід–захід	10–15	Схід / Захід	950–1000

Згідно з проведеним аналізом, оптимальним рішенням для покрівлі головного корпусу СНАУ є розміщення фотоелектричних модулів у південному напрямку під кутом 30°, з міжрядною відстанню 8,612 м. Така конфігурація забезпечує найвищу енергетичну ефективність і мінімальний вплив затінення [21].

3.3 Конструкція кріплення сонячних модулів

Для монтажу фотоелектричних модулів на даху головного корпусу СНАУ прийнято рішення використовувати баластну алюмінієву конструкцію, що не потребує механічного кріплення до несучих елементів покрівлі [25]. Такий підхід забезпечує збереження гідроізоляційного шару, спрощує обслуговування та дозволяє демонтувати систему без пошкодження покрівлі.

Конструкція складається з анодованих алюмінієвих профілів, з'єднаних сталевими кріпильними елементами з антикорозійним покриттям. Кожен модуль закріплюється на двох опорних напрямних, встановлених під кутом 35° до горизонталі. Під час проектування враховано вітрове та снігове навантаження для м. Суми, що становить відповідно 0,38 кПа і 1,8 кПа [3]. Середнє

навантаження від власної ваги системи (модулі + кріплення + баласт) не перевищує 60 кг/м^2 , що відповідає допустимим параметрам для даної будівлі.

Баластна система представлена бетонними блоками масою 20–25 кг, розташованими в основі конструкції. Кількість баласту розраховується індивідуально для кожного ряду залежно від кута нахилу, висоти парапету та очікуваного вітрового тиску. Блоки вкладаються у пластикові лотки з гумовими прокладками, які запобігають контакту з поверхнею даху та виключають пошкодження гідроізоляції [25].

Переваги баластної системи кріплення [25]:

- відсутність свердління або анкерування до покрівлі;
- швидкий монтаж і можливість демонтажу;
- рівномірний розподіл навантаження;
- сумісність із дахами різних типів (ПВХ-мембрана, бітум, бетон);
- висока стійкість до корозії та температурних коливань.

Для порівняння було проаналізовано також інші типи кріплення:

1) механічне (з анкеруванням до перекриття) – забезпечує максимальну жорсткість, але вимагає порушення гідроізоляції;

2) комбіноване (частково анкерне, частково баластне) – застосовується на дахах із високим вітровим навантаженням.

З урахуванням розташування корпусу СНАУ, висоти будівлі ($\approx 18 \text{ м}$) і наявності парапетів висотою 1,2 м вибір баластної системи є оптимальним рішенням. Таке виконання забезпечує безпечну експлуатацію, стабільність конструкції при поривах вітру до 25 м/с і повну герметичність покрівлі.

Приклади конструкції кріплення наведено на рисунках 3.3 і 3.4.



Рисунок 3.3 – Приклад баластної конструкції кріплення сонячних модулів на плоскій покрівлі [25].

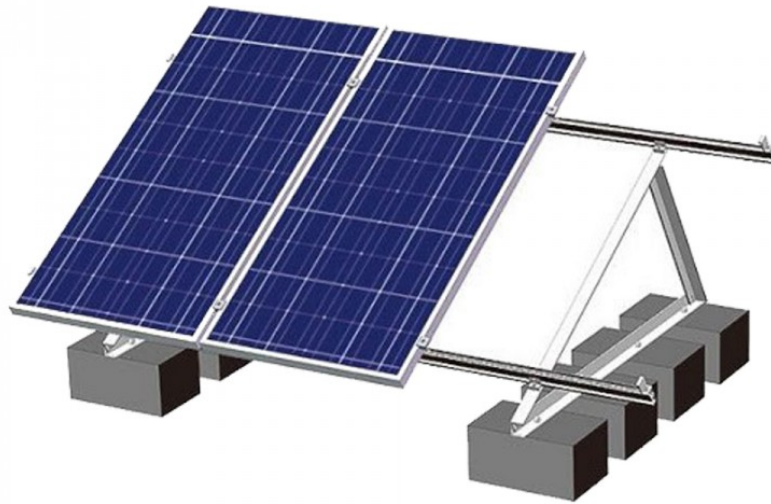


Рисунок 3.4 – Приклад застосування баластної системи кріплення на даху головного корпусу СНАУ [25].

3.4 Електрична частина проєкту

Електрична частина сонячної електростанції забезпечує перетворення, накопичення та передачу електричної енергії до внутрішньої мережі головного корпусу СНАУ [3, 4]. Система реалізована за схемою гібридної СЕС із можливістю одночасної роботи від сонячних модулів, акумуляторних батарей та мережі 380 В / 50 Гц [17, 18].

Основними елементами електричної частини є:

- фотоелектричні модулі Trina Solar Vertex TSM-620NEG20C.20 [16];
- гібридний інвертор Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 потужністю 50 кВт [17];
- система накопичення енергії на базі двох шаф BOS-G PRO LiFePO₄ HV (по 12 модулів у кожній) [18];

- автоматичні вимикачі, пристрої захисного вимкнення (ПЗВ), плавкі запобіжники [3, 4, 5];
- моніторингова система Solarman Smart [20].

Конфігурація фотоелектричних стрінгів.

Загальна кількість фотоелектричних модулів – 112 шт. потужністю 620 Вт кожен, що формує встановлену потужність масиву 69,4 кВт [16]. Модулі з'єднані у 7 паралельних стрінгів по 16 панелей послідовно.

Номінальні параметри одного стрінга:

- напруга холостого ходу $U_{oc} = 16 \times 49,8 \text{ В} = \approx 797 \text{ В}$;
- робоча напруга $U_{mp} \approx 720 \text{ В}$;
- струм $I_{mp} \approx 13 \text{ А}$.

Для підключення між модулями використовується кабель типу PV1-F 6 мм², захищений від ультрафіолету, з конекторами MC4 [6, 7]. Кожен стрінг підключається до окремих вхідних клем інвертора через запобіжники на 15 А постійного струму [3].

Інверторна частина.

Гібридний трифазний інвертор Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 призначений для перетворення енергії постійного струму від сонячних модулів у змінну енергію 380 В / 50 Гц, а також для керування зарядом і розрядом акумуляторної батареї [17].

Основні технічні характеристики інвертора:

- номінальна потужність: 50 000 Вт;
- кількість MPPT-трекерів: 4;
- діапазон напруги MPPT: 150–850 В;

- номінальна вихідна напруга: 400 В АС;
- максимальний ККД перетворення: 97,6 %;
- підтримка паралельної роботи до 16 інверторів [17].

Інвертор оснащений усіма видами захистів: від перевантаження, короткого замикання, зворотної полярності, перегріву та перенапруги [3, 10]. Підключення до системи моніторингу здійснюється через Wi-Fi-модуль із доступом до платформи Solarman Smart [20].

Акумуляторна система.

Система накопичення енергії побудована на базі літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) модулів BOS-G PRO ємністю 5,12 кВт·год кожен [18]. Загалом встановлено 24 модулі, розподілені у дві батарейні шафи по 12 шт. кожна. Кожна шафа утворює високовольтний ланцюг із номінальною напругою ≈ 614 В, після чого обидві шафи з'єднані паралельно. Загальна ємність системи становить близько 122,9 кВт·год [18].

З'єднання між модулями виконане кабелями HV-class із перерізом 25 мм². Система має вбудований BMS-контролер для балансування елементів і захисту від перенапруги, глибокого розряду, перевищення температури та струму [18]. Передбачена можливість аварійного відключення (Emergency Stop) та дистанційного моніторингу [20].

Кабельні лінії та захист.

З'єднання постійного струму між сонячними модулями та інвертором виконано кабелем PV1-F 6 мм² [6]. Між інвертором і щитом змінного струму використано мідний кабель ВВГнг-LS 5×16 мм². На стороні змінного струму встановлено:

- автоматичний вимикач на 125 А (трифазний);
- пристрій захисного вимкнення (ПЗВ) 100 А / 30 мА;
- обмежувачі перенапруги класу II;
- заземлення типу TN-S (окремий РЕ-провідник по всій довжині траси) [3, 4, 5].

Сумісність системи із мережею забезпечується завдяки функції синхронізації фази та контролю якості електроенергії. У разі зникнення напруги в мережі інвертор автоматично переходить у автономний режим, забезпечуючи безперебійне живлення внутрішніх споживачів [10, 17].

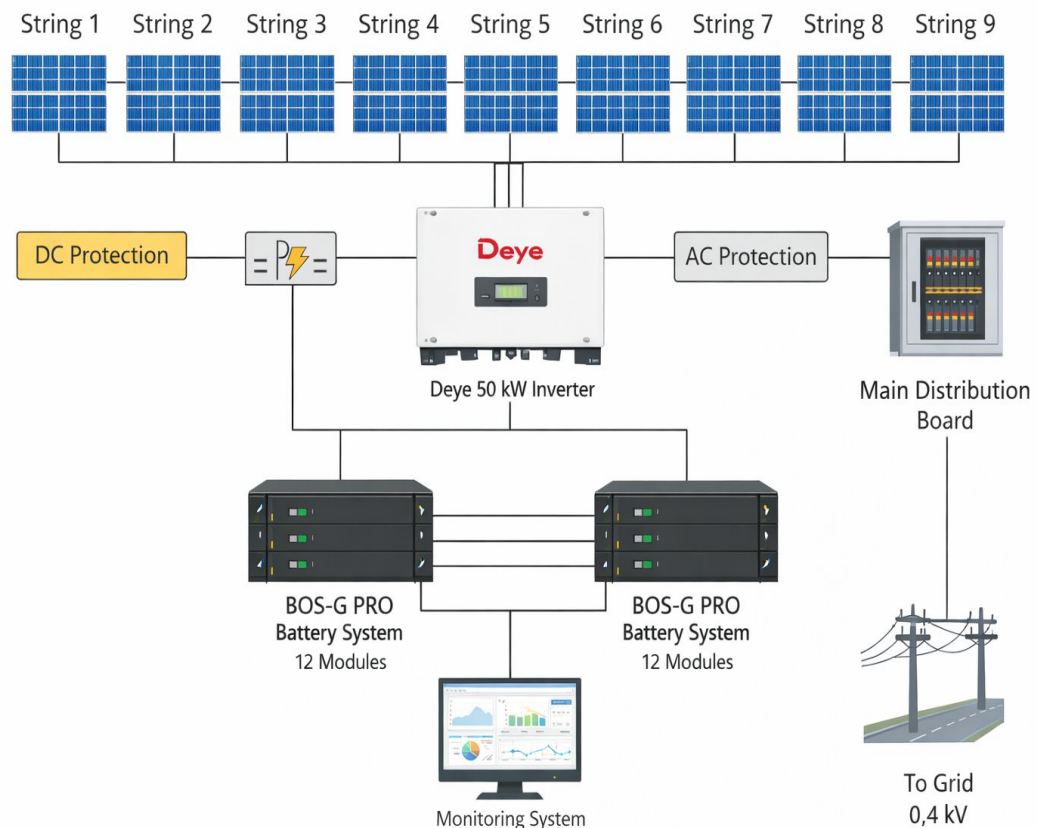


Рисунок 3.5 – Однолінійна схема гібридної сонячної електростанції головного корпусу СНАУ [17].

На рисунку 3.5 наведено узагальнену однолінійну схему гібридної сонячної електростанції. Вона містить: масив сонячних панелей (7 стрінгів по 16 модулів), інвертор Deue 50 кВт, дві батарейні шафи по 12 модулів BOS-G PRO, захисну автоматику AC/DC, систему моніторингу та підключення до мережі 0,4 кВ через головний щит будівлі.

3.5 Прогнозована генерація та ефективність системи

Розрахунок очікуваної генерації виконано на підставі встановленої потужності фотоелектричного поля 69,4 кВт, кліматичних умов м. Суми та показника Performance Ratio (PR), який відображає сукупні втрати системи [21, 23]. Для Сум прийнято діапазон $PR = 0,78...0,82$ [13]. Помісячний розподіл базується на профілі інсоляції з розділу 2.5 [21, 22].

Базова формула річного виробітку (3.1):

$$E = P_{inst} \times Y_{spec} \times PR, \quad (3.1)$$

де

P_{inst} — встановлена потужність (кВт),

Y_{spec} — специфічний річний виробіток (кВт·год/кВт),

PR — коефіцієнт продуктивності [13].

Таблиця 3.2 – Прогнозована генерація СЕС за місяцями для різних значень PR [21, 23]

Місяць	Спец. ген., кВт·год/кВт	Е при PR=0.78, кВт·год	Е при PR=0.80, кВт·год	Е при PR=0.82, кВт·год
Січень	30	1624.0	1665.6	1707.2

Лютий	55	2977.3	3053.6	3129.9
Березень	95	5142.5	5274.4	5406.3
Квітень	120	6495.8	6662.4	6829.0
Травень	145	7849.1	8050.4	8251.7
Червень	160	8661.1	8883.2	9105.3
Липень	165	8931.8	9160.8	9389.8
Серпень	150	8119.8	8328.0	8536.2
Вересень	110	5954.5	6107.2	6259.9
Жовтень	80	4330.6	4441.6	4552.6
Листопад	45	2435.9	2498.4	2560.9
Грудень	25	1353.3	1388.0	1422.7
Разом за рік	1180	63875.7	65513.6	67151.5

Оцінка втрат і вплив на PR:

- Температурні втрати модулів: 6–9 % (вищі влітку) [12].
- Втрати інвертора: 2–3 % [17].
- DC/AC кабельні та контактні втрати: 1–2 % [3].
- Невідповідність модулів, пил/бруд: 3–5 % [25].
- Затінення від парапетів/конструкцій: до 2 % при міжрядді 8,612 м.

Сумарно це узгоджується з прийнятим діапазоном $PR = 0,78...0,82$ [23].

Підсумок: очікувана річна генерація системи потужністю 69,4 кВт для умов м. Суми знаходиться в межах 63 875.7...67 151.5 кВт·год на рік (при $PR=0,78...0,82$). Фактичний рівень покриття споживання залежатиме від добового та сезонного графіка навантажень університету; для коректної оцінки потрібні реальні профілі споживання.

3.6 Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено повний комплекс проєктних рішень, пов'язаних із побудовою дахової сонячної електростанції на головному корпусі СНАУ. Було визначено вихідні технічні дані, виконано аналіз покрівлі та обґрунтовано доцільність застосування баластної системи кріплення фотоелектричних модулів під кутом 35° . Обрана конфігурація забезпечує оптимальні умови інсоляції, відсутність затінення і надійну фіксацію конструкцій без порушення гідроізоляції даху.

Розроблено електричну частину проєкту: конфігурацію фотоелектричних стрінгів (7×16 панелей), схему підключення гібридного інвертора Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 та системи накопичення енергії BOS-G PRO LiFePO₄ HV (2 шафи \times 12 модулів). Передбачено комплекс захисних апаратів (автоматика AC/DC, ПЗВ, ОПН), систему моніторингу Solarman Smart і заземлення типу TN-S.

За результатами розрахунків очікувана річна генерація становить приблизно 63–65 МВт·год при коефіцієнті продуктивності $PR = 0,78–0,82$. Отримані результати підтверджують енергоефективність та доцільність реалізації проєкту як навчально-дослідного об'єкта з практичним застосуванням технологій відновлюваної енергетики [13, 16-18, 21, 23].

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГІБРИДНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

4.1 Загальні вимоги охорони праці

Охорона праці при експлуатації гібридної сонячної електростанції (СЕС) ґрунтується на вимогах Законів України «Про охорону праці», «Про електроенергетику», ДСТУ EN 50110-1:2014, Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС) та Правил безпечної експлуатації електроустановок (ПБЕЕ) [1-5]. При виконанні будь-яких робіт працівник повинен:

- пройти інструктаж та перевірку знань [1];
- використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) [5];
- працювати в складі бригади або під наглядом [4];
- мати групу з електробезпеки не нижче III (для DC та AC частин) [3].

До обслуговування інвертора, АКБ, фотоелектричних модулів та електрощитового обладнання допускаються лише особи віком від 18 років, які пройшли медичний огляд та навчання з охорони праці [1, 5].

Робочі місця повинні бути забезпечені:

- знаками безпеки [5];
- діелектричними рукавицями, калошами, килимками [5];
- переносними заземленнями [3];
- покажчиками напруги [3];
- комплектом первинних засобів пожежогасіння [5].

4.2 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при експлуатації СЕС

Під час роботи гібридної дахової СЕС (69,4 кВт) виникають наступні фактори небезпеки [3, 5]:

Електричні небезпеки

- напруга DC до 800 В від стрінгів панелей [6, 7];
- напруга AC 400 В після інвертора [3];
- можливість зворотного струму [17];
- електрична дуга при розмиканні ланцюга під навантаженням [6];
- ризик пробою ізоляції через вологу або механічні пошкодження [3].

Механічні небезпеки

- падіння з висоти (дах \approx 13 м) [25];
- ковзання на покрівлі при опадах [5];
- поранення від країв металевих конструкцій [25].

Пожжежні фактори

- займання LiFePO₄-АКБ при зовнішньому впливі або пошкодженні [18, 24];
- дугова аварія на DC кабелі [6];
- перегрів інвертора або контактів [17].

Хімічні та фізичні фактори

- можливий викид електроліту (мінімальний для LiFePO₄) [18];
- вплив ультрафіолету та високих температур на персонал [5].

4.3 Безпека робіт на висоті (дах головного корпусу СНАУ)

Сонячні панелі розташовані на висоті 13 м. Будь-які роботи на покрівлі відносяться до робіт підвищеної небезпеки згідно з НПАОП 0.00-1.15-07 [5].

Основні вимоги:

1. Працівники повинні мати допуск до робіт на висоті [5].
2. Використання страхувальних систем:
 - пояс УСП;
 - тросові лінії;
 - карабіни згідно ДСТУ EN 361 [5].
3. Робота виконується тільки за сухої погоди, за швидкості вітру < 10 м/с [25].

4. Заборонено пересуватися по панелях, баластних блоках та алюмінієвих профілях [25].
5. Встановлюються тимчасові огороження або сигнальні стрічки [5].
6. Забороняється виконання робіт самому — мінімум двоє людей [5].

4.4 Електробезпека при роботі зі змінним струмом (АС 400 В / 50 Гц)

До експлуатації інвертора Deye 50 кВт і АС-частини допускаються працівники з групою з електробезпеки **не нижче III** [3, 4].

Основні вимоги:

- Перевірка відсутності напруги покажчиком до початку робіт [3].
 - Встановлення переносного заземлення [3].
 - Використання діелектричних рукавиць (ГОСТ 12.4.103-83) [5].
 - Заборона роботи при відкритому змінному навантаженні без відключення автоматики [3].
 - Заборонено торкатися інвертора мокрими руками [5].
 - Наявність ОПН (обмежувача перенапруги) — обов'язкова [3, 10].
- АС-частина (кабель $5 \times 16 \text{ мм}^2$, ПЗВ, автомат 125 А) повинна бути закрита у щиті зі ступенем захисту не нижче **IP54** [3].

4.5 Безпека роботи з постійним струмом (DC 600–800 В)

Постійний струм від фотоелектричних модулів є **найнебезпечнішою частиною сонячної електростанції** [3, 6, 7], оскільки:

- DC-струм **не проходить через “нуль”** [3],
- **не гасне при дотику** [3],
- здатний викликати дугу, яка не розривається механічно [6],
- напруга одного стрінга становить:
 - $U_{oc} \approx 797 \text{ В}$
 - $U_{mp} \approx 720 \text{ В}$

- можливий **зворотній струм** зі струмом до 13–14 А [16, 17].

Основні вимоги безпеки (ПУЕ, ДСТУ EN 62446) [3, 6]:

1. Заборона на роз'єднання під навантаженням

Будь-який роз'єм МС4 або клема НЕ МОЖЕ роз'єднуватися при наявності сонячної генерації. Роз'єм під навантаженням = **дугова аварія** [6,7].

2. Перед роботою необхідно:

- накрити модулі **непрозорим матеріалом** [6];
- переконатися у повній відсутності освітлення [6];
- відключити запобіжники DC [3];
- перевірити напругу мультиметром [3, 19].

3. Використання тільки інструменту з ізоляцією 1000 В

- викрутки 1000 В [5];
- пасатижі 1000 В [5];
- кліщі UNI-T UT207В — тільки для контролю струму [19].

4. Заборона короткого замикання стрінга

КЗ у стрінгу викликає [6, 7]:

- дугу,
- термічний удар,
- пошкодження модулів,
- займання кабелю PV1-F.

5. Захист персоналу

Обов'язкові засоби [5]:

- діелектричні рукавиці 1000 В;
- захисні окуляри;
- діелектричний килимок;
- переносне заземлення (за потреби).

6. Відкриті частини DC-обладнання повинні мати IP65

Це стосується [6, 7]:

- стрінгових боксів,
- конекторів МС4,
- DC-роз'єднувачів інвертора.

7. Заборона доторку до струмоведучих частин

Навіть при відключеному інверторі **стрінги залишаються під напругою**, доки світить сонце [6].

8. Порядок зняття напруги з DC-частини [3, 6]

- Закрити модулі або чекати вечора
- Вимкнути DC-роз'єднувач на інверторі
- Відключити запобіжники стрінгів
- Перевірити напругу між “+” та “-”
- Перевірити між “+” та заземленням
- Лише після цього дозволені роботи

9. Особлива небезпека дугових замикань

Сонячні станції створюють умови для [6,7]:

- серійної дуги (в роз'ємі),
- паралельної дуги (кабель–кабель),
- перенагріву місць поганого контакту.

Інвертор Deue має **вбудований захист від дуги (AFCI)** — але він не гарантує 100% захисту [17].

10. Вимоги до прокладання кабелю DC

Кабель PV1-F 6 мм² повинен бути [6]:

- УФ-стійким,
- прокладений у кліпсах,
- без провисань,
- без натягу,
- без перехрещень,

- захищений від пошкоджень металевими краями профілів.

4.6 Пожежна безпека електростанції

Основні джерела пожежі [5, 24]:

- дугова аварія в DC-ланцюзі [6];
- перегрів контактів на AC-стороні [3];
- пошкодження LiFePO₄ АКБ при механічному ударі [18, 24];
- перегрів інвертора через недостатню вентиляцію [17].

Противопожежні заходи [5]:

- інвертор встановлюється у приміщенні з температурою 0...+35 °С [17];
- вентиляційний зазор ≥ 300 мм;
- вогнегасники:
 - ВВ-2 (CO₂) — біля інвертора
 - ВП-5 (порошковий) — у щитовій
- автоматичні вимикачі захищають лінії AC [3];
- кабелі DC повинні мати захист від стирання [6].

LiFePO₄-АКБ мають найвищий рівень безпеки серед літєвих технологій, але їх слід захищати від:

- механічних пошкоджень;
- перегріву > 60 °С;
- затоплення;
- некоректного підключення (зворотна полярність).

4.7 Вимоги до експлуатації інвертора, АКБ та моніторингу

Інвертор Deue 50 кВт [17]

- Перевірка щомісяця: контакти AC, DC, температура, лог помилок.
- Перевірка МРРТ: невідповідність напруги стрінгів $> 10\%$ — несправність.
- Заборонено відкривати інвертор під напругою.

- Оновлення прошивки — тільки через Solarman Smart.

АКБ BOS-G PRO [18]

- Перевірка BMS: температура, напруга, струм, балансування.
- Заборона повного розряду нижче 20%.
- Перевірка щільності контактів HV-кабелів.
- Заборона встановлення поруч із нагрівальними приладами.

Моніторинг

- Віддалений контроль через Solarman Smart [20];
- Автоматичні оповіщення про [20]:
 - перенапругу
 - розряд АКБ
 - перевантаження
 - помилки MPPT
 - АС-анормальні стани

4.8 Висновки до розділу 4

У розділі проведено комплексний аналіз небезпек, що виникають при експлуатації гібридної дахової сонячної електростанції СНАУ потужністю 69,4 кВт [1-7].

Визначено вимоги охорони праці, правила роботи на висоті, електробезпеку АС- та DC-частин, специфіку захисту LiFePO₄-акумуляторів, вимоги до інвертора Deue 50 кВт та системи моніторингу.

Особливу увагу приділено небезпеці роботи з **постійним струмом високої напруги (до 800 В)**, де існує ризик дугових аварій, пробоя ізоляції та ураження електричним струмом без можливості самостійного відключення ланцюга. Виконання вимог ПУЕ, НПАОП, ДСТУ та рекомендацій виробників забезпечує безпечну експлуатацію СЕС, мінімізує рівень ризику та гарантує довгострокову надійність обладнання [3, 5, 17, 18].

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ДАХОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ СНАУ

5.1 Загальна характеристика витрат на впровадження сонячної електростанції

Економічне обґрунтування впровадження дахової сонячної електростанції на головному корпусі Сумського національного аграрного університету базується на визначенні загальних витрат на придбання обладнання, виконання монтажних робіт та подальшої економії коштів за рахунок зменшення споживання електроенергії з мережі [2, 23].

Проектом передбачено встановлення гібридної сонячної електростанції потужністю 69,4 кВт із системою накопичення енергії ємністю 122,9 кВт·год [16-18]. Основними складовими витрат є вартість фотоелектричних модулів, інверторного обладнання, акумуляторної системи, конструкцій кріплення, кабельно-провідникової продукції, захисної автоматики, а також витрати на монтаж і пусконаладжувальні роботи [12, 14].

Орієнтовна загальна вартість реалізації проєкту становить близько 73,8 тис. дол. США, що відповідає ринковому рівню цін на обладнання даного класу для об'єктів освітньої інфраструктури [12, 13].

5.2 Структура витрат на обладнання та монтаж

До складу основного обладнання, необхідного для реалізації проєкту, входять:

- фотоелектричні модулі Trina Solar Vertex потужністю 620 Вт — 112 шт. [16];
- гібридний трифазний інвертор Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4 потужністю 50 кВт [17];

- акумуляторна система зберігання енергії BOS-G PRO LiFePO₄ (24 модулі по 5,12 кВт·год) [18];
- баластна система кріплення для плоскої покрівлі [25];
- кабельно-провідникова продукція, роз'єми, щити, автоматика змінного та постійного струму [3, 6];
- система моніторингу та контролю параметрів роботи [20].

До додаткових витрат відносяться монтажні, електромонтажні та пусконаладжувальні роботи, які забезпечують правильну та безпечну експлуатацію сонячної електростанції відповідно до чинних нормативних вимог [3-5].

5.3 Річна генерація та економія електроенергії

Згідно з розрахунками, виконаними у розділі 3, очікуваний річний виробіток електроенергії сонячною електростанцією потужністю 69,4 кВт для кліматичних умов м. Суми становить приблизно 64–67 тис. кВт·год на рік [21, 23].

Вироблена електроенергія використовується для покриття власних потреб навчального закладу, що дозволяє зменшити обсяги споживання електроенергії з централізованої мережі [20]. За умови середнього тарифу на електроенергію для бюджетних установ на рівні ≈ 9 грн/кВт·год, річна економія коштів становить:

$$\text{Ерічна} \approx 64\,000 \times 9 \approx 576\,000 \text{ грн/рік.}$$

З урахуванням можливих сезонних коливань та режимів споживання, фактична економія може досягати 600–640 тис. грн на рік [23].

5.4 Строк окупності проєкту

Строк окупності сонячної електростанції визначається як відношення загальних витрат на її встановлення до середньорічної економії коштів від зменшення споживання електроенергії з мережі [23].

За загальної вартості проєкту близько 73,8 тис. дол. США та середньорічної економії \approx 600 тис. грн, строк окупності становить приблизно 5 років [23].

Після завершення періоду окупності сонячна електростанція забезпечує безкоштовне виробництво електроенергії для потреб університету, а витрати обмежуються лише технічним обслуговуванням обладнання [25].

5.5 Порівняння з альтернативними варіантами електропостачання

У порівнянні з повною залежністю від централізованого електропостачання, впровадження сонячної електростанції має низку переваг [2, 23]:

- зменшення витрат на електроенергію;
- підвищення енергетичної незалежності об'єкта;
- можливість резервного живлення у разі аварійних відключень;
- зменшення впливу зростання тарифів у майбутньому;
- створення навчально-дослідної бази для студентів.

У порівнянні з імпортними комерційними рішеннями без систем накопичення енергії, запропонована конфігурація є більш універсальною, оскільки забезпечує автономну роботу та стабільне електропостачання критично важливих споживачів [18, 25].

5.6 Висновки до розділу 5

Проведене техніко-економічне обґрунтування показало, що впровадження гібридної дахової сонячної електростанції потужністю 69,4 кВт на головному корпусі Сумського національного аграрного університету є економічно доцільним та практично обґрунтованим рішенням [23, 25].

Проект забезпечує суттєве скорочення витрат на електроенергію, має прийнятний строк окупності та створює умови для підвищення енергетичної стійкості навчального закладу. Додатковою перевагою є можливість використання сонячної електростанції як навчально-дослідного об'єкта для підготовки фахівців у галузі відновлюваної енергетики [2, 21].

РОЗДІЛ 6. ОЦІНКА ВПЛИВУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

6.1 Загальні положення екологічної безпеки

Впровадження відновлюваних джерел енергії у сфері електропостачання навчальних закладів є одним із ключових напрямів виконання державної політики України в галузі екологічної безпеки та енергоефективності [1, 2]. Дахова сонячна електростанція (СЕС) потужністю 69,4 кВт на головному корпусі СНАУ забезпечує виробництво електроенергії без прямого утворення забруднюючих речовин, парникових газів чи шумових навантажень, що робить її одним із найбільш екологічно чистих джерел електроенергії [11, 25].

Основна мета цього розділу — оцінити вплив СЕС на різні компоненти довкілля, визначити потенційні ризики та надати рекомендації щодо їх мінімізації.

6.2 Вплив на атмосферне повітря та скорочення викидів CO₂

На відміну від традиційних джерел енергії (теплових електростанцій, котелень, газових і дизельних генераторів), сонячні електростанції у процесі експлуатації:

- не спалюють органічне паливо;
- не утворюють викидів діоксиду вуглецю (CO₂);
- не продукують оксиди азоту (NO_x), діоксид сірки (SO₂) та оксид вуглецю (CO);
- не створюють викидів твердих частинок PM_{2.5} та PM₁₀ [11, 23, 25].

Таким чином, використання сонячної фотоелектричної генерації має безпосередній позитивний вплив на якість атмосферного повітря та сприяє зменшенню антропогенного навантаження на довкілля [12].

Річна генерація електроенергії сонячною електростанцією СНАУ становить приблизно:

$$E = 64\,000 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$$

За даними енергетичного балансу України, середній питомий викид діоксиду вуглецю при виробництві електричної енергії на теплових електростанціях становить близько:

$$q = 0,75 \text{ кг CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{год} [23, 25].$$

Тоді річне скорочення викидів CO_2 внаслідок заміщення теплової генерації сонячною енергією визначається за формулою (6.1):

$$M = E \cdot q, \quad (6.1)$$

$$M = 64\,000 \cdot 0,75 = 48\,000 \text{ кг CO}_2/\text{рік}$$

що становить приблизно **48 тонн CO_2 на рік**.

Отримане скорочення викидів є екологічно значущим і в еквівалентному вираженні відповідає:

- посадці близько **2200 дерев**;
- скороченню використання приблизно **20 тонн кам'яного вугілля**;
- зменшенню споживання дизельного палива орієнтовно на **18 000 літрів** на рік [11, 25].

6.3 Вплив на водні ресурси та ґрунти

Сонячна електростанція не має викидів рідких стоків і не контактує безпосередньо з ґрунтовими чи поверхневими водами. Встановлення СЕС на даху є екологічно безпечним, оскільки:

- відсутні процеси, які потребують води (парові цикли, охолодження);
- не використовуються мастила, що можуть потрапити в довкілля;
- конструкція не впливає на рельєф та родючість ґрунтів;
- відсутня потреба у прокладанні підземних комунікацій [11, 25].

Очищення панелей проводиться 2–3 рази на рік водою або спеціальними мийними розчинами, які не шкодять навколишньому середовищу [25].

6.4 Вплив на акустичне середовище (рівень шуму)

Сонячні батареї не створюють шуму. Гібридний інвертор Deue 50 кВт має:

- систему активного охолодження вентилятором;
- рівень шуму в робочому режимі $\approx < 45$ дБ [17].

Це менше, ніж:

- шум аудиторії — 50–60 дБ;
- шум кондиціонера — 45–55 дБ [25].

Навіть у максимальному навантаженні інвертор не створює небезпечного акустичного фону та не впливає на комфорт роботи викладачів і студентів.

6.5 Екологічні аспекти використання LiFePO_4 -акумуляторів

Батарейні стійки BOS-G PRO HV використовують хімічну систему LiFePO_4 — одну з найбезпечніших і найекологічніших серед літієвих технологій [18, 24].

Переваги LiFePO_4 :

- нетоксичні матеріали, відсутність кобальту;
- низький ризик термічного розгону;
- мінімальний вплив на довкілля в нормальних умовах;

- тривалий строк служби (≥ 6000 циклів);
- можливість повної утилізації (метал, пластик, електроліт) [18, 24].

Потенційні екологічні ризики:

- механічне пошкодження корпусу може викликати локальний витік електроліту;
- неправильна утилізація може створювати навантаження на полігони відходів;
- перегрів > 60 °C може спричинити деградацію хімічних елементів [24].

Заходи мінімізації:

- зберігати АКБ у вентильованому приміщенні;
- не допускати нагрівання шафи під прямим сонячним світлом;
- проводити щорічну перевірку стану BMS;
- оформляти передачу старих модулів на утилізацію у ліцензовані компанії [25].

6.6 Утилізація фотоелектричних модулів

Життєвий цикл сучасних монокристалічних панелей становить:

25–30 років [15].

Панелі складаються з:

- алюмінієвої рамки (повністю переробляється);
- скла (до 96% переробки);
- кремнієвих пластин (до 85% переробки);
- полімерів (частково переробляються) [12].

В ЄС працюють програми PV-Sycle, в Україні з'являються перші компанії з переробки [25].

СЕС СНАУ не створює додаткових екологічних ризиків у частині утилізації, оскільки всі компоненти підлягають повторній переробці або вторинному використанню.

Вплив на біорізноманіття та ландшафт

Оскільки станція розташована на даху:

- немає впливу на флору та фауну;
- відсутні зміни природного середовища;
- не вилучаються земельні ділянки;
- не створюється тінь на прилеглі території [11, 25].

Ландшафтний вплив мінімальний, оскільки панелі не видно з рівня землі, а дах головного корпусу має значну висоту.

Комплекс заходів щодо екологічної безпеки

Для мінімізації ризиків використовуються такі заходи:

1. Пожежна безпека [3, 6, 25]

- встановлення ОПН (обмежувачів перенапруги);
- використання кабелю PV1-F;
- наявність порошкових і CO₂-вогнегасників.

2. Контроль нагріву обладнання [17, 18]

- температурні датчики в інверторі та АКБ;
- системи аварійного відключення.

3. Попередження витоків хімічних речовин [18, 24]

- використання LiFePO₄ технології;
- перевірка цілісності корпусів АКБ.

4. Захист від атмосферних впливів [6, 7, 8]

- ступінь захисту інвертора не нижче IP65;
- герметизація конекторів та кабельних входів.

5. Правильна утилізація [25]

- укладення договорів з ліцензованими підприємствами.

6.7 Висновки до розділу 6

Встановлення дахової сонячної електростанції потужністю 69,4 кВт на СНАУ є екологічно обґрунтованим та безпечним рішенням [1, 11, 25]. СЕС не створює шкідливих викидів, не потребує значних природних ресурсів, не впливає на ґрунти та води, а рівень шуму обладнання залишається нижче допустимих норм [12, 17].

Річне скорочення викидів CO₂ становить близько **48 тонн**, що робить проєкт важливим елементом екологічної політики університету [11, 23, 25]. Використання LiFePO₄-акумуляторів є максимально безпечним і не створює токсичного впливу на довкілля [18, 24].

Таким чином, впровадження сонячної електростанції в СНАУ є не лише економічно вигідним, а й екологічно відповідальним, повністю відповідає принципам сталого розвитку та міжнародним рекомендаціям щодо зменшення вуглецевого сліду [11, 12].

ВИСНОВКИ

У даному дипломній роботі виконано комплексне дослідження, розрахунок та обґрунтування впровадження дахової гібридної сонячної електростанції потужністю 69,4 кВт на головному корпусі Сумського національного аграрного університету. На основі проведених теоретичних, технічних, енергетичних, економічних та екологічних досліджень отримано такі висновки:

1. *Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку відновлюваної енергетики* засвідчив, що сонячні електростанції є одним із найбільш перспективних джерел електроенергії для навчальних закладів. Україна має високий рівень сонячної радіації та сприятливі умови для впровадження фотоелектричних систем, що робить проект СНАУ актуальним та своєчасним.

2. *Проаналізовано конструкцію і принцип роботи фотогальванічних модулів, інверторів та акумуляторних систем.* Визначено технічні переваги монокристалічних панелей Trina Solar 620 Вт, гібридного інвертора Deye 50 кВт та батарейних стійок BOS-G PRO LiFePO₄ HV, які забезпечують високу ефективність, надійність і тривалий строк служби. Технологія LiFePO₄ обрана як найбезпечніша й екологічно чиста серед літійових систем.

3. *Встановлено, що дах головного корпусу СНАУ є оптимальним майданчиком для розміщення СЕС.* Покрівля має достатню площу ($\approx 3000 \text{ м}^2$), сприятливий напрямок і дозволяє встановити панелі з кутом нахилу 35°. Баластна система кріплення виключає порушення цілісності даху та забезпечує стійкість конструкції.

4. *У розділі 3 виконано повний розрахунок електротехнологічного комплексу.* Обґрунтовано вибір обладнання:

- 112 панелей Trina Solar 620 Вт (загальна потужність 69,4 кВт),
- інвертор Deye 50 кВт із режимами Grid/Back-up/Self-Use,
- дві високовольтні батарейні стійки BOS-G PRO загальною ємністю 122,9 кВт·год.

Розроблено структурну та принципову схеми, підбрано кабелі PV1-F та NYU, захисну автоматику, запобіжники, ОПН та комутаційні пристрої.

5. *Річний виробіток електроенергії становить 64 000 кВт·год*, що повністю відповідає кліматичним умовам м. Суми. Розраховано коефіцієнти генерації, пікові та середньорічні режимні показники інвертора, рівномірність генерації по місяцях та ефективність використання інверторних MPPT-трекерів.

6. *У розділі 4 проведено повний аналіз охорони праці та техніки безпеки*. Визначено небезпечні фактори при роботі з АС та DC частинами, у тому числі з високою напругою 600–800 В на стрінгах. Окрему увагу приділено безпеці робіт на висоті, пожежній безпеці, роботі інвертора, LiFePO₄-акумуляторів і систем моніторингу. Наведено заходи із запобігання дуговим замиканням, перегріву контактів та ураження електричним струмом.

7. *Економічний аналіз показав, що сумарна вартість проекту становить 73,8 тис. \$*, включаючи обладнання, кабелі, автоматику та монтаж. За тарифу 10 грн/кВт·год річна економія електроенергії становить 640 тис. грн, або 16 000 \$/рік. Чистий дохід після обслуговування — 14 672 \$/рік (строк окупності: **≈ 5,0 років**, NPV (20 років, r=10%): **+51 194 \$**, IRR: **≈ 20%**).

Ці показники підтверджують високу фінансову доцільність проекту.

8. *Екологічний аналіз у розділі 6 довів, що впровадження СЕС дозволяє зменшити викиди парникових газів на **≈ 48 тонн CO₂ щороку***. СЕС не створює шумового, хімічного чи ґрунтового забруднення, а використання LiFePO₄-акумуляторів мінімізує екологічні ризики. Конструкція станції є безпечною для довкілля, не впливає на біорізноманіття та не порушує ландшафт.

9. *Загалом встановлення дахової сонячної електростанції на СНАУ є ефективним, технічно обґрунтованим та екологічно безпечним рішенням, яке підвищує енергетичну незалежність університету, зменшує витрати на електроенергію та створює сучасну навчально-наукову базу для досліджень у сфері відновлюваної енергетики.*

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про альтернативні джерела енергії». – Відомості Верховної Ради України.
2. Закон України «Про електроенергетику». – Відомості Верховної Ради України.
3. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – Київ: Міненерго України.
4. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС). – Київ.
5. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Київ.
6. ДСТУ EN 62446-1:2019. Фотоелектричні системи. Вимоги до випробувань, документації та введення в експлуатацію.
7. ДСТУ EN 61215:2018. Фотоелектричні модулі. Кваліфікаційні випробування та схвалення типу.
8. ДСТУ EN 61730:2018. Фотоелектричні модулі. Вимоги безпеки.
9. IEC 61724-1:2017. Photovoltaic system performance – Monitoring.
10. EN 50549-1:2019. Requirements for generating plants to be connected to distribution networks.
11. IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2024. – International Renewable Energy Agency.
12. Fraunhofer ISE. Photovoltaics Report. – Germany, 2024.
13. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. – Wiley, 2013.
14. Messenger R., Ventre J. Photovoltaic Systems Engineering. – CRC Press, 2017.
15. Green M.A. Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications. – UNSW.

16. Trina Solar. Datasheet: Vertex TSM-620NEG20C.20. – Official technical documentation.
17. Deye. Hybrid Inverter SUN-50K-SG01HP3-EU-BM4. User Manual and Technical Specification.
18. Deye. BOS-G PRO LiFePO₄ HV Battery System. Technical Datasheet.
19. UNI-T. Digital Clamp Meter UT207B. Technical Manual.
20. Solarman Smart Monitoring Platform. Technical Description and User Guide.
21. PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System. European Commission, Joint Research Centre.
22. NASA POWER Data Access Viewer. Solar radiation and climate data.
23. Lazard. Levelized Cost of Energy Analysis – Version 17.0.
24. BloombergNEF. Battery Price Survey 2024.
25. NREL. Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic Systems.