НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва інституту)

Кафедра електропостачання
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Олена БОРИЧЕНКО
«___»_____20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітня програма
Системи забезпечення споживачів електричною енергією

на тему: «*Оптимізація роботи гібридної сонячної електростанції приватного будинку за допомогою програмного середовища PVsyst***»**
Виконала: студентка ІІ курсу, групи ГЕ-41мп

_____Могилат Маргарита Юріївна_____ _____
(прізвище, ім'я по батькові) (підпис)

Науковий керівник *к.т.н., доц. Ткаченко В.В.*_____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Нормоконтроль *провідний інженер Прокопенко І.Д.* _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент_____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студентка _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет *Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту*

Кафедра *електропостачання*
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма «Системи забезпечення споживачів електричною енергією»

Завідувач кафедри
_____ Олена БОРИЧЕНКО
«___»_____2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Могилат Маргарита Юріївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «*Оптимізація роботи гібридної сонячної електростанції приватного будинку за допомогою програмного середовища PVsyst*
науковий керівник дисертації *к.т.н., доц. Ткаченко В.В.*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від 03 листопада *2025 р. №4749-с*
2. Строк подання студентом дисертації *17 грудня 2025 року*
3. Об'єкт дослідження: енергетичні процеси у гібридній фотоелектричній системі.
4.Предмет дослідження: особливості модернізації роботи гібридної сонячної електростанції.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку сонячної енергетики в Україні та Європі; описати технічні характеристики та енергетичні особливості приватного домогосподарства, для якого проєктується гібридна електростанція; здійснити моделювання роботи гібридної електростанції у програмному

середовищі *PVsyst*; проаналізувати фактори, що впливають на ефективність роботи фотоелектричних систем; дослідити вплив технології фотоелектричних модулів, вплив кута нахилу панелей та вплив забруднення поверхні модулів на ефективність гібридної системи.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація – наочні матеріали за результатами дослідження, графіки та діаграми.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Могилат М.Ю., Ткаченко В.В., Яценко Д.В. «Оптимізація роботи гібридної сонячної електростанції для приватного будинку у програмному середовищі PVsyst» міжнародна науково-технічна конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'25». Україна, Київ, 18-20 листопада 2025 року.

8. Консультанти розділів дисертації

Нормоконтроль *Прокопенко І.Д.*

9.Дата видачі завдання *01 вересня 2025 року*

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Отримання завдання	01.08.2025	
2	Аналіз літературних джерел	28.08.2025	
3	Формулювання вступної частини	01.09.2025	
4	Робота над першим розділом	26.09.2025	
5	Робота над другим розділом	20.10.2025	
6.	Робота над третім розділом	20.11.2025	
7.	Розробка стартап проєкту	24.11.2025	
8.	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	15.12.2025	
9.	Передзахист МД	17.12.2025	
10.	Захист дисертації	22.12.2025	

Студент _____ _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації _____ _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи. Загальний обсяг магістерської дисертації складає 115 сторінок основного тексту, в тому числі 7 формул, 25 рисунків, 21 таблиця, 57 літературних джерел та 3 додатки.

Актуальність теми. Зростання тарифів на електроенергію, вимоги до енергоефективності та часті відключення електропостачання зумовили різке зростання інтересу приватних домогосподарств до автономних джерел енергії. У таких умовах гібридні сонячні електростанції набувають стратегічної цінності, адже поєднують функції генерації, резервування та оптимізації споживання. Водночас ефективність приватної гібридної електростанції значною мірою визначається коректно обраною конфігурацією: технологією модулів, кутом нахилу, температурними втратами, характеристиками інвертора, режимами роботи та реальними кліматичними умовами.

Мета дослідження. Підвищення ефективності та надійності роботи гібридної сонячної електростанції приватного домогосподарства шляхом її моделювання та оптимізації у програмному середовищі *PVsyst*, а також аналіз основних технічних, кліматичних і експлуатаційних факторів, що впливають на річний виробіток.

Об’єкт дослідження: енергетичні процеси у гібридній фотоелектричній системі.

Предмет дослідження: особливості модернізації роботи гібридної сонячної електростанції.

Наукова новизна. У роботі вперше для конкретного приватного домогосподарства здійснено комплексне моделювання та оптимізацію гібридної сонячної електростанції з використанням програмного середовища *PVsyst*. Отримані результати доповнюють існуючі підходи до проєктування побутових фотоелектричних систем та розширюють методичну базу моделювання гібридних сонячних електростанцій у програмному середовищі *PVsyst*.

Методи дослідження. Комп'ютерне моделювання параметрів гібридної сонячної електростанції у програмному середовищі *PVsyst 8.0.18* з використанням реальних кліматичних даних.

Практичне значення роботи полягає в можливості застосування отриманих результатів для проєктування, модернізації та оптимізації побутових гібридних сонячних електростанцій. Розроблена конфігурація гібридної електростанції може бути використана як типове рішення для приватних домогосподарств, що прагнуть підвищити енергонезалежність та зменшити витрати на електроенергію.

Моделювання у середовищі PVsyst дозволяє точно оцінювати річний виробіток, структуру втрат та поведінку системи в різних режимах, що дає змогу інсталяторам та власникам будинків приймати обґрунтовані технічні рішення щодо вибору обладнання, орієнтації та кута нахилу модулів, характеристик інвертора та можливості використання акумуляторних систем.

Апробація результатів роботи. Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'25». Україна, Київ, 18-20 листопада 2025 року.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ГІБРИДНА СИСТЕМА, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ЧЕТВЕРТИЙ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПАКЕТ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ МОДУЛІ, КУТ НАХИЛУ, ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХНІ МОДУЛІВ.

ABSTRACT

Structure and volume of the work. The total volume of the master's thesis is 115 pages of the main text, including 7 formulas, 25 figures, 21 tables, 57 literary sources, and 3 appendices.

Relevance of the topic. Rising electricity tariffs, increasing energy efficiency requirements, and frequent power outages have sharply intensified the interest of private households in autonomous energy sources. Under these conditions, hybrid solar power plants gain strategic importance, as they combine the functions of generation, backup, and consumption optimization. At the same time, the efficiency of a private hybrid power plant is largely determined by a properly selected configuration: module technology, tilt angle, temperature losses, inverter characteristics, operating modes, and real climatic conditions.

Research aim. To improve the efficiency and reliability of a hybrid solar power plant for a private household by means of its modelling and optimization in the PVsyst software environment, as well as to analyze the main technical, climatic, and operational factors influencing the annual energy yield.

Object of research: energy processes in a hybrid photovoltaic system.

Subject of research: features of modernization of the operation of a hybrid solar power plant.

Scientific novelty. For the first time, this work performs comprehensive modelling and optimization of a hybrid solar power plant for a specific private household using the PVsyst software environment. The obtained results complement existing approaches to the design of residential photovoltaic systems and expand the methodological basis for modelling hybrid solar power plants in PVsyst.

Research methods. Computer modelling of parameters of a hybrid solar power plant in the PVsyst 8.0.18 software environment using real climatic data.

Practical significance of the work lies in the possibility of applying the obtained results for the design, modernization, and optimization of residential hybrid solar power plants. The developed configuration of the hybrid power plant can be used as a typical solution for private households seeking to increase energy independence and reduce electricity costs.

Modelling in PVsyst makes it possible to accurately assess the annual energy yield, loss structure, and system behaviour under different operating modes, enabling installers and homeowners to make informed technical decisions regarding the selection of equipment, module orientation and tilt angle, inverter characteristics, and the feasibility of using battery systems.

Approval of the research results. International scientific and technical conference “Energy Management: State and Prospects of Development – PEMS’25”, Ukraine, Kyiv, November 18–20, 2025.

Keywords: SOLAR POWER PLANT, HYBRID SYSTEM, RENEWABLE ENERGY SOURCES, FOURTH ENERGY PACKAGE, PHOTOVOLTAIC MODULES, TILT ANGLE, MODULE SURFACE SOILING.

Зміст

ВСТУП 12

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИВАТНОГО СЕКТОРУ14

1.1 Сучасний стан сонячних електростанцій приватних домогосподарств в Україні 14

1.2 Основні виклики та тенденції розвитку сонячної енергетики в Україні 15

1.3 Аналіз нормативно-правової бази 17

1.3.1 Регуляторне середовище для сонячної електростанції в Україні 17

1.3.2 Регуляторне середовище для фотоелектричних систем Європейського Союзу 19

1.4 Можливості та перспективи сонячної генерації для приватного сектору 20

1.5 Роль децентралізованої генерації у розвитку приватних сонячних станцій 21

1.6 Вплив 4-го Енергетичного пакета Європейського Союзу на розвиток малої генерації та домашніх сонячних електростанцій 23

1.6.1 Участь споживачів та енергетичних спільнот у ринку електроенергії24

1.6.2 Підтримка малої та розподіленої генерації в рамках Четвертого енергетичного пакета Європейського Союзу 27

1.6.3 Вплив імплементації 4-го Енергопакету Європейського Союзу на енергетичний сектор України 28

1.7 Постановка проблеми підвищення ефективності сонячної електростанції приватного будинку 30

1.7.1 *SWOT*-аналіз проблеми підвищення ефективності домашньої сонячної електростанції 30

1.8 Аналіз зацікавлених сторін у розвитку домашніх сонячних електростанцій 32

Висновки до розділу 1 34

РОЗДІЛ 2 ОПИС ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ 35

2.1 Характеристика приватного домогосподарства 35

2.2 Вибір програмного середовища PVsyst 36

2.3 Кліматичні умови, інсоляційні показники та вихідні метеодані для моделювання 37

2.3.1 Сонячний потенціал території України 37

2.3.2 Метеорологічні дані за базою *Meteonorm* 38

2.4 Структурна схема гібридної сонячної електростанції 40

2.5 Методика моделювання еталонної гібридної електростанції в програмному забезпеченні PVsyst 42

2.5.1 Вибір типу фотоелектричної системи 42

2.5.2 Двонаправлений лічильник електроенергії та його роль у гібридний сонячній станції 43

2.5.3 Завдання орієнтації фотоелектричного поля 45

2.5.4 Імпорт технічних характеристик обладнання 46

Висновки до розділу 2 53

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ 55

3.1 Аналіз факторів, що впливають на ефективність роботи фотоелектричних систем 55

3.2 Ключові фактори, що підлягають детальному аналізу 69

3.3 Аналіз змодельованих сценаріїв 70

3.3.1 Теоретичні розрахункові співвідношення 70

3.3.2 Аналіз впливу технології фотоелектричних модулів на продуктивність системи 71

3.3.3 Аналіз впливу кута нахилу панелей на енергетичну ефективність 74

3.3.4 Аналіз впливу забруднення поверхні модулів на ефективність системи 75

3.4 Фінальний опис оптимізованої гібридної електростанції 77

3.4.1 Коефіцієнт продуктивності 78

3.4.2 Енергетичний баланс 78

3.4.3 Помісячна референтна інсоляція 81

3.4.4 Нормалізовані показники виробітку та структурні втрати 82

3.4.5 Добова динаміка корисної вихідної енергії 83

3.5 Розрахунок реальної річної ефективності масиву 85

3.6 Перевірка розрахунку температурних втрат за температурним коефіцієнтом 86

3.7 Аналіз впливу гібридної електростанції на скорочення викидів CO_2 87

Висновки до розділу 3 88

РОЗДІЛ 4 СТАРТАП-ПРОЄКТ 90

4.1 Опис ідеї стартап-проєкту 90

4.1.1 Ключові особливості ідеї *EcoPower Assist* 91

4.2 Технологічний аудит стартап-проєкту 92

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту 94

4.3.1 Портрет цільового покупця 94

4.3.2 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку 95

4.3.3 Фактори загроз та можливостей 98

4.3.4 *SWOT*-аналіз 100

4.4 Розроблення маркетингової програми проєкту 101

Висновки до розділу 4 105

ВИСНОВКИ 107

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 109

ДОДАТКИ 116

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

СЕС – сонячна електростанція;

АЕС – атомна електростанція;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ЄС – Європейський Союз;

АКБ – акумуляторна батарея;

ОСББ – об’єднання співвласників багатоквартирного будинку;

КМУ – Кабінет Міністрів України;

ВРУ – Верховна Рада України;

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

РНБО – Рада національної безпеки і оборони;

ОМС – Органи місцевого самоврядування;

ККД – коефіцієнт корисної дії.

ВСТУП

Сонячна енергетика за останнє десятиліття стала одним із найдинамічніших напрямів розвитку відновлюваних джерел енергії як у світі, так і в Україні. Зростання цін на електроенергію, посилення вимог до енергоефективності та масові відключення електропостачання змусили приватний сектор активно шукати автономніші та надійніші рішення. У таких умовах домашні сонячні електростанції, особливо гібридного типу, набули стратегічного значення, оскільки дозволяють поєднувати генерацію, резервування та оптимізацію споживання енергії.

Водночас реальна ефективність приватної сонячної електростанції (СЕС) залежить не лише від встановленої потужності чи вартості обладнання, а передусім від коректно підібраної конфігурації системи. Кут нахилу модулів, кліматичні умови, рівень забруднення поверхні, сезонна температура, особливості роботи інвертора та роль акумуляторної батареї — усі ці фактори можуть суттєво впливати на річний виробіток та економічну доцільність установки. Тому питання технічної оптимізації домашніх СЕС стає одним із ключових для приватних користувачів, які прагнуть отримати максимальний результат від інвестицій у власну генерацію.

Для таких досліджень однією з найточніших і найвикористовуваніших професійних платформ є програмне середовище *PVsyst*, яке дозволяє моделювати різні конфігурації СЕС, оцінювати виробіток електричної енергії у реальних кліматичних умовах і прогнозувати поведінку обладнання протягом року. Завдяки широкому набору інструментів *PVsyst* дає змогу не лише отримати фізичну модель роботи СЕС, а й обґрунтувати вибір оптимальних параметрів системи для конкретного об’єкта.

Особливо актуальним таке моделювання є для приватних домогосподарств України, де кліматичні умови, нерівномірність навантаження та часто

нестабільна робота мережі потребують ретельного підходу до проєктування гібридних систем. Саме тому дане дослідження зосереджене на аналізі роботи фотоелектричної станції приватного будинку в м. Чернівці та оцінці впливу основних технічних і кліматичних параметрів на її річну продуктивність.

Оптимізація конфігурації гібридної СЕС дозволяє підвищити коефіцієнт продуктивності, збільшити частку самоспоживання виробленої сонячної електроенергії та забезпечити стабільне електроживлення навіть у складних режимах роботи мережі. Отримані результати можуть бути використані для проєктування побутових фотоелектричних систем, оцінки економічної ефективності та обґрунтування вибору обладнання для приватного сектору.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИВАТНОГО СЕКТОРУ

1.1 Сучасний стан сонячних електростанцій приватних домогосподарств в Україні

На сьогодні сонячна енергетика є одним із провідних джерел відновлюваної енергії в Україні. Потужність домашніх СЕС у приватних домогосподарствах зросла до 84 МВт.

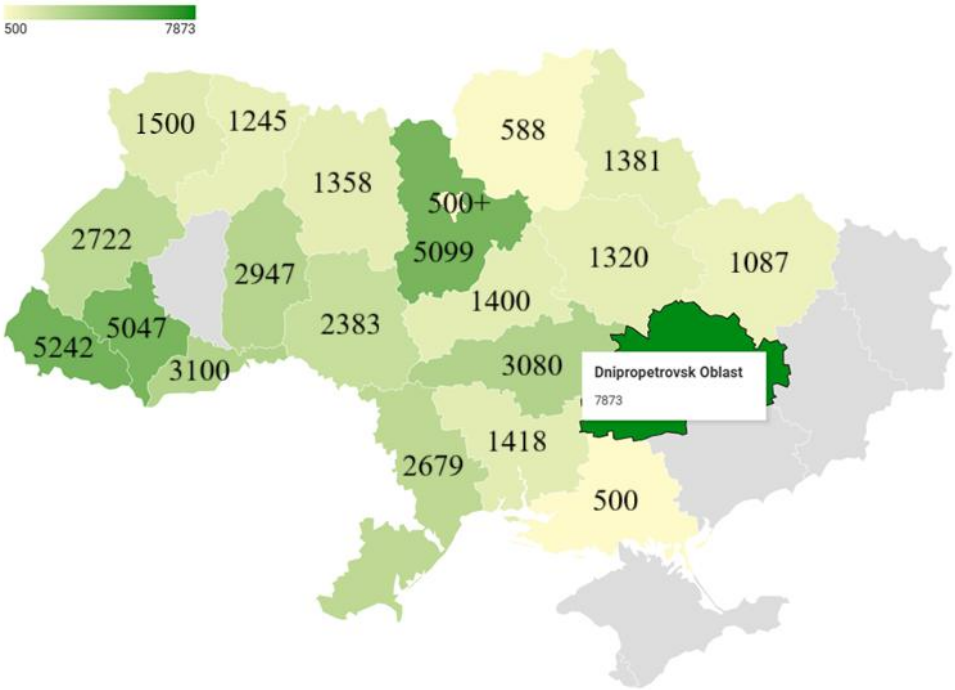


Рисунок 1.1 - Кількість сонячних електростанцій за областями України

Найсприятливішими для розміщення промислових СЕС є південні та центральні області, проте через військові дії розташування нових станцій зміщується в регіони з меншим ризиком обстрілів. В Україні налічується більше 55 тисяч домашніх СЕС. Основна мета їх встановлення — стале енергозабезпечення та зменшення залежності від централізованих джерел електроенергії.

На рис. 1.1 видно, що безумовним лідером стала Дніпропетровська область, в якій кількість домашніх СЕС вже наближається до 8 тис. одиниць. Після неї в списку йдуть Закарпатська область — 5242 установок; Київська область — 5099 установок; Івано-Франківська область — 5047 установок; Чернівецька область — 3100 установок; Кіровоградська область — 3080 установок; Хмельницька область — 2947 установок; Львівська область — 2722 установки; Одеська область — 2679 установок; Вінницька область — 2383 установки.

Меншу кількість СЕС мають північні та східні області, що пов’язано з нижчою сонячною активністю та наслідками бойових дій.

Не були опубліковані дані щодо приватних СЕС у Тернопільській, Запорізькій, Донецькій, Луганській областях [1].

1.2 Основні виклики та тенденції розвитку сонячної енергетики в Україні

У 2025 році сонячна енергетика України перебуває на етапі глибокої трансформації. Попри значні руйнування енергетичної інфраструктури, спричинені бойовими діями, галузь демонструє стійкість і поступове відновлення.

Основні виклики галузі можна поділити на кілька груп:

1. Фізичні втрати та руйнування об’єктів. Значної шкоди зазнали сонячні електростанції, розташовані у Херсонській, Миколаївській, Запорізькій, Донецькій і Харківській областях. Частина об’єктів була зруйнована або окупована, інші втратили можливість підключення через пошкодження ліній електропередачі та трансформаторних підстанцій.

2. Проблеми з підключенням нових потужностей. Через руйнування високовольтних мереж і нестачу технічних ресурсів виникли труднощі з інтеграцією нових або відновлених станцій до енергосистеми. Це стримує розвиток нових проєктів, особливо у південних регіонах [2].

3. Регіональний дисбаланс між генерацією та споживанням. На Заході зосереджені потужні атомні електростанції (АЕС), тоді як значна частина

енергоємних підприємств знаходиться у Центрі та на Сході. Це створює потребу транспортування електроенергії на великі відстані, включно з імпортною. Домашні сонячні електростанції у регіонах, де споживання перевищує місцеву генерацію, можуть стикатися з обмеженнями на відпуск надлишкової енергії в мережу. Це знижує економічну вигоду приватних СЕС, оскільки надлишок енергії може залишатися невикористаним або змушує інвестувати у акумулятори для зберігання.

4. Перевантаження системи передачі електроенергії. Це знижує надійність роботи мережі та підвищує вартість електроенергії через технічні втрати, необхідність інвестицій у реконструкцію системи передачі та застосування механізму редиспетчеризації, коли генерацію на Заході обмежують на користь більш дорогих джерел у Центрі та на Сході. Перевантаження мережі призводить до того, що оператори можуть обмежувати відпуск електроенергії з приватних СЕС у мережу, що зменшує доходи від “зеленого тарифу” та ефективність системи. Крім того, технічні обмеження можуть спричиняти часті коливання напруги, що впливає на стабільну роботу домашніх СЕС [3].

5. Фінансові та інвестиційні ризики**.** Невизначеність, воєнні ризики та зміни у “зеленому” тарифі ускладнили залучення приватних інвесторів. Проте ситуація частково компенсується підтримкою міжнародних партнерів, які фінансують програми відновлення та модернізації енергетичної інфраструктури.

6. Необхідність переходу до децентралізованої моделі енергозабезпечення. Досвід масових відключень 2022–2024 років продемонстрував вразливість централізованої системи.

7. Технологічні виклики та потреба у модернізації. В умовах війни галузь потребує більш ефективних, стійких і мобільних технологічних рішень. Зростає попит на гібридні системи та системи моніторингу та “розумного” керування енергоспоживанням.

1.3 Аналіз нормативно-правової бази

1.3.1 Регуляторне середовище для сонячної електростанції в Україні

Законодавча база для підтримки сонячної енергетики в Україні за останні роки пройшла кілька етапів реформування. Це необхідно для створення сприятливих умов для розвитку відновлювані джерела енергії (ВДЕ), зокрема сонячної енергетики, а також для забезпечення енергетичної незалежності країни та зменшення впливу на навколишнє середовище. В основні нормативні документи входять:

1. Закон України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII [4].

2. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV [5].

3. Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» від 17.02.2011 № 3038-VI [6].

4. Закон України «Про Національну комісію, що здійснює державнерегулювання у сферах енергетики та комунальних послуг» від 22.09.2016 № 1540-VIII [7].

5. Кодекс систем передачі [8].

6. Кодекс систем розподілу [9].

7. Постанова НКРЕКП № 2651 від 29.12.2023 «Про затвердження Порядку продажу та обліку електричної енергії, виробленої активними споживачами, та розрахунків за неї» [10].

8. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. №761-р «Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання» [11].

9. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 липня 2024 р. № 713-р «Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року» [12].

10. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 р. №587-р «Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024 - 2026 роках» [13].

11. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2022 р. № 908-р «Про схвалення Концепції впровадження "розумних мереж" в Україні до 2035 року» [14].

12. Постанова НКРЕКП від 25.03.2025 № 465 «Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств» [15].

13. Постанова НКРЕКП від 30.08.2019 № 1817 «Про затвердження Порядку встановлення, перегляду та припинення дії «зеленого» тарифу на електричну енергію для суб'єктів господарської діяльності, споживачів електричної енергії, у тому числі енергетичних кооперативів, та приватних домогосподарств, генеруючі установки яких виробляють електричну енергію з альтернативних джерел енергії» [16].

14. СОУ НЕК 341.001:2019 Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України [17].

15. ДСТУ 8328:2015 Геліоенергетика. Модулі фотоелектричні. Загальні технічні вимоги [18].

16. ДСТУ EN 60904-1:2009. Фотоелектричні прилади. Частина 1: Фотоелектричні вольтамперні характеристики. Методи вимірювання [19].

17. ДСТУ EN 60904-2:2018 Прилади фотоелектричні. Частина 2. Вимоги до базових фотоелектричних приладів [20].

18. ДСТУ ISO 9488:2010 Енергія сонячна. Словник термінів [21].

19. ДСТУ EN 62109-1:2014 (EN 62109-1:2010, IDT; IEC 62109-1:2010, IDT) Безпечність силових перетворювачів, застосовуваних у фотоелектричних системах. Частина 1. Загальні вимоги [22].

20. ДСТУ EN 62109-2:2014 (EN 62109-2:2011, IDT; IEC 62109-2:2011, IDT) Безпечність силових перетворювачів, застосовуваних у фотоелектричних системах. Частина 2. Спеціальні вимоги до інверторів [23].

21. ДСТУ EN IEC 61730-1:2018 (EN IEC 61730-1:2018; AC:2018-06, IDT; IEC 61730 1:2016, IDT) Визначення безпеки фотоелектричних модулів. Частина 1. Вимоги до конструкції [24].

22. ДСТУ EN IEC 61730-2:2018 (EN IEC 61730-2:2018; AC:2018-06, IDT; IEC 61730 2:2016, IDT) Визначення безпеки фотоелектричних модулів. Частина 2. Вимоги до випробувань [25].

1.3.2 Регуляторне середовище для фотоелектричних систем Європейського Союзу

Четвертий енергетичний пакет Європейського Союзу (ЄС), який набув чинності у 2019 році [26], є важливою складовою частиною Стратегії створення Енергетичного союзу ЄС.

Складники пакету:

1. Директива (ЄС) 2018/844 «Про енергетичну ефективність будівель» [27].
2. Директива (ЄС) 2018/2001 «Про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел» [28].
3. Директива (ЄС) 2018/2002 «Про енергоефективність» [29].
4. Регламент (ЄС) 2018/1999 «Про управління Енергетичним Союзом та боротьбу зі зміною клімату» [30].
5. Регламент (ЄС) 2019/941 «Про готовність до ризиків у секторі електроенергетики» [31].
6. Регламент (ЄС) 2019/942 «Про заснування Агентства Європейського Союзу із співробітництва органів енергетичного регулювання (ACER)» [32].
7. Регламент (ЄС) 2019/943 «Про внутрішній ринок електроенергії» [33].
8. Директива (ЄС) 2019/944 «Про загальні правила для внутрішнього ринку електроенергії» [34].

1.4 Можливості та перспективи сонячної генерації для приватного сектору

Попри численні виклики, з якими зіткнулися українські домогосподарства через руйнування енергетичної інфраструктури та блекаути, все ж таки відкриваються нові можливості для розвитку приватних СЕС:

1. Перехід від моделі «зеленого тарифу» до систем *Net netering* та *Net billing* стимулюватиме домогосподарства активно інвестувати у власну енергетичну автономію. У рамках *Net metering* власник СЕС насамперед використовує вироблену електроенергію для власних потреб, а надлишок, що подається у мережу, компенсується у вигляді зменшення рахунку за спожиту електроенергію. Такий підхід заохочує ефективне самоспоживання, підвищує енергетичну незалежність домогосподарств та зменшує навантаження на централізовану генерацію. У рамках *Net billing* споживач насамперед використовує власну вироблену електроенергію, а надлишок, який подається у мережу, компенсується за ринковою ціною, що заохочує максимально ефективне самоспоживання. Корпоративні PPA, у свою чергу, передбачають прямі угоди між виробником і покупцем електроенергії з фіксованою або договірною ціною, що дозволяє власникам СЕС планувати доходи незалежно від державних тарифів і мотивує збільшувати потужності для власного споживання та продажу. Обидві моделі створюють стимули для підвищення енергетичної самодостатності приватних СЕС та зменшення залежності від централізованої генерації.

2. Сучасні тенденції у світовій сонячній енергетиці свідчать про активну інтеграцію передових технологій у побутові сонячні електростанції. Зокрема, штучний інтелект *(AI)*, Інтернет речей *(IoT)*, хмарні обчислення, великі дані *(Big Data)*, сенсорні системи, енергетичні контури та квантові технології використовуються для підвищення ефективності проєктування, прогнозування, обслуговування та управління *PV*-системами. Поєднання цих технологій дозволяє реалізувати концепцію «розумного дому». Це створює основу для високоефективного, стабільного і надійного енергопостачання домогосподарств,

дозволяючи їм управляти виробництвом, споживанням та накопиченням електроенергії в автономному режимі [35].

3. Україна має можливість залучати міжнародні гранти, кредити та облігації для підтримки розвитку відновлюваної енергетики. Це дозволить не лише відновити пошкоджену інфраструктуру, а й сприяти розвитку децентралізованих систем енергопостачання, що є важливим кроком у напрямку енергетичної незалежності.

4. Розвиток цифрових платформ моніторингу та прогнозування створює передумови для появи локальних енергетичних спільнот і віртуальних електростанцій *(VPP)*, у яких приватні користувачі можуть об'єднувати свої системи для спільного керування генерацією та обміну електроенергією.

5. Європейський досвід підтверджує, що саме децентралізовані енергетичні спільноти на основі побутових СЕС є ефективним механізмом підвищення стійкості енергетики та досягнення кліматичних цілей. У межах політики *«Clean Energy for All Europeans»* вони отримують законодавче визнання як суб'єкти ринку, здатні продавати надлишки енергії та брати участь у балансуванні системи.

1.5 Роль децентралізованої генерації у розвитку приватних сонячних станцій

Децентралізована або розподілена генерація — це система виробництва та передачі енергії, яка передбачає велику кількість споживачів, що водночас є виробниками електрики та тепла для власних потреб, і мають можливість передавати надлишки виробленої енергії до загальної мережі.

Закон України «Про ринок електричної енергії» [4] визначає розподілену генерацію як "електростанція, встановленої потужності 20 МВт та менше, приєднана до системи розподілу електричної енергії" [36].

Основні недоліки традиційної централізованої енергетики:

Історично системи електропостачання базувалися на великих електростанціях, які передавали електроенергію споживачам через магістральні

та розподільчі мережі, що характерно й для України. Така централізована модель має ряд недоліків:

1. Викиди з вугільних електростанцій шкодять здоров'ю населення та сприяють зміні клімату.

2. Безпека АЕС залишається питанням через ризики аварій та проблему високорадіоактивних відходів, вартість їх утилізації не врахована у ціні електроенергії [36].

3. Уразливість до кібератак та фізичних загроз через централізований характер мережі.

Основні переваги розподіленої генерації та її значення для України

Розвиток розподіленої генерації відкриває для громад та громадян України низку важливих переваг, що поєднують світові тенденції та національні потреби:

1. Зменшення втрат електроенергії. Тобто, чим більша відстань від місця виробництва електроенергії до споживача, тим більші втрати при передачі через мережі. Розподілені системи, встановлені безпосередньо біля споживача, значно знижують ці втрати та підвищують ефективність використання електроенергії в Україні.

2. Швидке будівництво систем. Планування, отримання дозволів і будівництво великих електростанцій займає багато років. Малі генераційні системи можна зводити набагато швидше, і сумарно вони здатні вирішити питання дефіциту потужностей у значно коротші терміни, особливо в умовах відновлення та модернізації енергосистем після бойових дій та природних аварій.

3. Забезпечення додаткових сервісів. Розподілені системи дозволяють оператору мережі віддалено керувати виробництвом електроенергії, забезпечуючи балансування мережі та регулювання реактивної потужності. Це особливо актуально для України, де багато ліній електропередач і трансформаторів перевищили нормативний термін експлуатації.

4. Підвищення безпеки енергопостачання. Децентралізоване тепло- й електропостачання підвищує надійність мережі, зменшує потребу у додаткових балансуючих потужностях та знижує ризик перебоїв через аварії або зовнішні

фактори (паводки, військові дії, терористичні загрози). Малі системи генерації дозволяють забезпечувати електроенергією соціальні заклади (школи, садочки, лікарні, центри реабілітації) навіть під час відключень централізованої мережі.

5. Використання ВДЕ не виробляє шкідливих викидів, що зменшує забруднення повітря та ризики для здоров’я населення. Широке впровадження малих систем генерації сприятиме виведенню старих вугільних і теплових станцій з експлуатації, покращуючи якість повітря та ефективність використання природних ресурсів.

6. Відновлювана енергетика створює довгострокові та добре оплачувані робочі місця: монтаж та обслуговування СЕС, транспортування сільськогосподарських відходів для біоенергетики тощо. Місцеві громади можуть інвестувати у власні енергетичні проєкти через кооперативи або об'єднання співвласників багатоквартирного будинку (ОСББ), отримуючи прибуток від виробленої енергії та залучаючи кредитне фінансування.

1.6 Вплив 4-го Енергетичного пакета Європейського Союзу на розвиток малої генерації та домашніх сонячних електростанцій

4-й Енергетичний пакет Європейського Союзу *(Clean Energy for All Europeans Package)* складається з 9 директив, присвячених різним аспектам функціонування енергетичних ринків — від регулювання секторів електроенергії та природного газу до питань енергоефективності, захисту прав споживачів і розвитку ВДЕ.

Кожна з директив доповнюється іншими нормативно-правовими актами ЄС, зокрема регламентами *(EU Regulations)*, які деталізують механізми реалізації закладених у них положень і забезпечують їх безпосереднє застосування у державах-членах. У межах цього дослідження основна увага приділяється малим учасникам ринку електроенергії — виробникам та споживачам, які використовують відновлювані джерела енергії. Саме тому для аналізу є найбільш релевантними дві директиви 4-го Енергетичного пакету ЄС:

1) директива (ЄС) 2018/2001 Європейського Парламенту та Ради від 11 грудня 2018 року щодо сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел [28];

2) директива (ЄС) 2019/944 Європейського Парламенту та Ради від 5 червня 2019 року щодо спільних правил внутрішнього ринку електроенергії [34];

3) регламент 2018/1999 «Про управління Енергетичним Союзом та боротьбу зі зміною клімату» [30].

1.6.1 Участь споживачів та енергетичних спільнот у ринку електроенергії

Однією з ключових інновацій 4-го Енергетичного пакету ЄС є визнання активної ролі споживачів у функціонуванні енергетичних ринків.

Якщо попередні пакети переважно регулювали відносини між державами, постачальниками та операторами систем, то нова законодавча архітектура зосереджується на громадянинові як центральному суб'єкті енергетичного переходу.

Преамбули та статті Директив *(EU)* 2018/2001 [28] і *(EU)* 2019/944 [34] прямо визначають, що споживачі мають не лише право купувати електроенергію, але й створювати власні джерела енергії, споживати, накопичувати та продавати її на ринку.

Розширення ролі громадян призводить до формування таких категорій учасників енергетичного ринку:

1. Активні споживачі *(Active Customers).*

Відповідно до положень Директиви *(EU)* 2019/944 [34], кожен споживач має право:

1) генерувати електроенергію для власного споживання;
2) накопичувати її в локальних системах зберігання;
3) продавати надлишки на організованих ринках або через агрегаторів;
4) брати участь у програмах керування попитом *(demand response)*.

Держави-члени зобов'язані усунути будь-які дискримінаційні бар'єри (збори, складні процедури чи додаткові податки), які перешкоджають активним

споживачам у реалізації цих прав. Крім того, споживачі мають бути поінформованими про ризики і переваги участі в динамічних ринках електроенергії.

2. Агрегатори — це компанії, що об'єднують розподілені енергетичні ресурси (малі генератори, керовані навантаження, засоби накопичення) та координують їхню участь у ринку. Вони дозволяють, наприклад, віддалено керувати акумуляторами в привтаних будинках, заряджаючи чи розряджаючи їх одночасно та надаючи послуги на ринку або отримуючи прибуток від різниці у ціні електроенергії.

Агрегатори важливі для стимулювання розподіленої ВДЕ-генерації, оскільки дають малим виробникам можливість брати участь у ринках, де індивідуально це економічно недоцільно через обмежений масштаб або відсутність технічного та адміністративного ресурсу.

3. Самоспоживачі енергії з ВДЕ *(Renewable Self-Consumers).*

Директива *(EU)* 2018/2001 [28] вводить поняття «самоспоживач» — фізична або юридична особа, яка виробляє енергію з ВДЕ для власних потреб, зберігає її, споживає і може продавати надлишки. Особливу увагу приділено груповим самоспоживачам, наприклад мешканцям багатоквартирних будинків, які можуть спільно користуватися даховими сонячними установками.

Директива забороняє накладати штрафи або додаткові збори за самогенерацію та споживання енергії на місці, водночас зобов'язуючи споживачів робити збалансований внесок у підтримку мережевої інфраструктури.

4. Енергетичні спільноти громадян *(Citizen Energy Communities).*

Директива *(EU)* 2019/944 [34] закріплює поняття енергетичної спільноти громадян — об'єднання осіб, що добровільно кооперуються для виробництва, споживання, зберігання та розподілу енергії. Такі спільноти:

1) є юридичними особами, які можуть діяти на ринку від власного імені;
2) мають демократичну структуру управління (кожен член бере участь у прийнятті рішень);

3) відкриті для нових учасників і не можуть контролюватися великими комерційними операторами;
4) можуть навіть виступати операторами систем розподілу — як закритих, так і відкритих.

Енергетичні спільноти розглядаються як інструмент соціальної згуртованості: вони стимулюють місцевий розвиток, створення робочих місць і залучення приватного капіталу на рівні громад.

5. ВДЕ-спільноти *(Renewable Energy Communities).*

Директива *(EU)* 2018/2001 [30] вперше вводить поняття ВДЕ-спільноти — груп громадян, муніципалітетів, що спільно інвестують у виробництво енергії з відновлюваних джерел. Такі спільноти мають право:

1) брати участь у схемах підтримки на рівні з великими виробниками;
2) отримувати адміністративні пільги (спрощене приєднання, коротші терміни розгляду, «єдине вікно» для дозволів);
3) користуватись інформаційною, технічною та фінансовою підтримкою від держави.

ВДЕ-спільноти є важливим елементом переходу до децентралізованої моделі енергетики, у якій енергія виробляється, розподіляється і споживається на місцевому рівні.

6. Горизонтальна взаємодія між гравцями ринку.

Окрім створення сприятливої законодавчої рамки для ВДЕ-спільнот та агрегаторів, а також запропонували нові моделі функціонування ринків, що мають великий потенціал.

Однією з таких моделей є горизонтальна торгівля електроенергією *(peer-to-peer trading)*. Згідно зі статтею 2 Директиви про ВДЕ, це продаж електроенергії між учасниками ринку за попередньо визначеними умовами, який може здійснюватися безпосередньо або через агрегатора. Право на участь у такій торгівлі надається споживачам, виробникам, постачальникам та агрегаторам. Наявність цього визначення створює юридичне підґрунтя для роботи спільнот, які обмінюються електроенергією, виробленою, наприклад, у домашніх

установках, без надлишкового державного регулювання. Прикладом такої ініціативи є *Brooklyn Microgrid* у США, де група громадян обмінюється енергією зі своїх СЕС та акумуляторів. *Peer-to-peer trading* стимулює розвиток децентралізованої генерації та розподілених енергетичних ресурсів, створюючи більш інклюзивний ринок.

7. Спільне використання ВДЕ-установок *(electricity sharing).*

Ще одним важливим механізмом є спільне використання ВДЕ-установок. Директива дозволяє самоспоживачам, що знаходяться в одній будівлі, спільно використовувати свої установки для виробництва електроенергії та обмінюватися нею між собою. При цьому оплата за використання мережі, що їм не належить, має бути недискримінаційною. Це положення сприяє ефективнішому використанню децентралізованих ресурсів та розвитку локальних енергетичних спільнот [37].

1.6.2 Підтримка малої та розподіленої генерації в рамках Четвертого енергетичного пакета Європейського Союзу

Документ передбачає такі механізми підтримки:

1. Звільнення малих установок від участі в аукціонах. Держави можуть не вимагати участі малих електростанцій на відновлюваних джерелах енергії у тендерних чи аукціонних процедурах.

2. Спрощення адміністративних процедур. Для малих установок передбачено спрощені умови отримання дозволів і погоджень порівняно з великими енергетичними проєктами.

3. Обмеження тривалості дозвільного процесу. Для об’єктів потужністю до 150 кВт строк розгляду заявок не повинен перевищувати одного року.

4. Розроблення національних посібників із підключення. Кожна держава-член зобов’язана створити довідковий документ, що містить покрокові інструкції щодо підключення нових потужностей ВДЕ, зокрема для малих інсталяцій.

5. Спрощення процедур підключення до мережі. Для установок потужністю 10–50 кВт держави мають забезпечити спрощені процедури підключення. Для

установок до 10 кВт допускається застосування повідомного (декларативного) принципу — підключення здійснюється за простим повідомленням без складної дозвільної процедури.

1.6.3 Вплив імплементації 4-го Енергопакету Європейського Союзу на енергетичний сектор України

Імплементація 4-го Енергетичного пакета ЄС передбачає гармонізацію українського енергетичного законодавства з європейськими стандартами, створення прозорих ринкових умов та стимулювання участі різних категорій споживачів у виробництві та споживанні електроенергії.

У цьому напрямі Україна разом із вісьмома іншими країнами-членами Енергетичного Співтовариства має гармонізувати національне законодавство з такими ключовими директивами ЄС:

1) директива 2018/2001 «Про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел» [28];

2) директива 2018/2002 «Про енергоефективність» [31];

3) регламент 2018/1999 «Про управління Енергетичним Союзом та боротьбу зі зміною клімату» [30] , [38].

У рамках цих змін можна виділити кілька ключових положень, які впливають на розвиток приватного сектору, кооперативів і місцевих громад:

1. Визначення та підтримка енергетичних спільнот громадян. Законодавство повинно чітко визначати статус таких спільнот, встановлювати критерії їх прибутковості/неприбутковості, гарантувати недискримінаційний доступ до ринку та дозволяти утворювати власні мережі або орендувати їх.

2. Право на генерацію, зберігання, споживання та продаж електроенергії. Учасники ринку повинні мати можливість здійснювати ці дії без дискримінації та зайвих адміністративних бар’єрів, продавати надлишкову електроенергію за ринковою або договірною ціною та брати участь у балансуючих ринках через агрегаторів.

3. Спрощення дозвільних процедур для малих установок (до 50 кВт). Це передбачає можливість повідомчого характеру замість дозволів та обмеження

строків розгляду документів, що зменшує витрати та прискорює приєднання дахових СЕС.

4. Створення умов для інтеграції малих гравців на ринку. Це включає участь у аукціонах, ринках допоміжних послуг та діяльність через агрегаторів. Такий підхід стимулює колективні моделі виробництва та споживання енергії й дозволяє домогосподарствам ефективно реалізовувати надлишки електроенергії.

5. Запровадження масштабованих схем підтримки. Наприклад, винятки для малої генерації з тендерних процедур, спеціальні преміальні механізми *(Feed-in Premium, Contracts for Difference)* та надання консультативної, технічної і фінансової допомоги місцевим ВДЕ-ініціативам.

6. Публічне дослідження бар'єрів для малих гравців та децентралізованої генерації. Регулятор має визначати існуючі перешкоди для розвитку ВДЕ-ініціатив, робити результати публічними та залучати до обговорення стейкхолдерів, включаючи уряд, регулятора та учасників ринку.

7. Підвищення гранулярності регулювання. Різні категорії учасників ринку повинні підпадати під різний рівень складності регулювання, технічних вимог та адміністративно-дозвільних процедур. Для малих виробників це означає спрощене приєднання до мереж, полегшені ліцензійні умови та можливість ефективної участі у ринках електроенергії.

8. Розробка регуляторної рамки для агрегаторів. Законодавство має визначати статус агрегаторів, забезпечувати їх недискримінацію, створювати технічні стандарти та правила участі в організованих ринках, а також механізми отримання винагороди за надання послуг.

9. Підтримка самоспоживачів та групових самоспоживачів. Необхідно законодавчо закріпити визначення цих категорій, гарантувати недискримінаційний доступ до мереж і можливість ефективного використання власної ВДЕ-генерації для задоволення внутрішніх потреб.

10. Правова основа для горизонтальної торгівлі електроенергією *(peer-to-peer trading та electricity sharing)*. Законодавство повинно встановлювати визначення таких моделей та методології, за якими енергетичні спільноти та

самоспоживачі можуть обмінюватися електроенергією між собою без надлишкового державного регулювання.

Поступове впровадження положень 4-го Енергетичного пакету сприятиме формуванню більш відкритого та конкурентного енергетичного ринку в Україні. Така структура буде децентралізованою та доступною для нових учасників. Політика розвитку розподіленої генерації не лише сприятиме демонополізації енергетичного сектору, а й стане ефективним інструментом для реалізації кліматичних цілей, визначених Паризькою угодою [37 , 39].

1.7 Постановка проблеми підвищення ефективності сонячної електростанції приватного будинку

Недостатня оптимізація конфігурації гібридних фотоелектричних систем у приватних домогосподарствах призводить до зниження їх ефективності. В умовах реалізації положень Четвертого енергетичного пакета ЄС, який сприяє децентралізації енергосистеми та розвитку розподіленої генерації, підвищення ефективності роботи таких систем набуває особливої актуальності.

1.7.1 *SWOT*-аналіз проблеми підвищення ефективності домашньої сонячної електростанції

Виявлено такі сильні сторони:

1. Високий потенціал сонячної енергетики в Україні, особливо у південних регіонах з великою кількістю сонячних днів.

2. Можливість забезпечення стабільного енергопостачання за рахунок поєднання різних джерел енергії.

3. Зменшення витрат на електроенергію та залежності від централізованої мережі.

4. Зростаюча підтримка України та країн ЄС до ВДЕ.

5. Наявність сучасних програмних засобів моделювання, які можуть бути адаптовані для детального аналізу.

6. Попит з боку приватних та комерційних замовників.

7. Використання екологічно чистих джерел енергії, що знижує викиди CO_2.

Виявлено такі слабкі сторони:

1. Відсутність комплексних і регіонально орієнтованих досліджень, що ускладнює прийняття обґрунтованих інвестиційних рішень.

2. Висока початкова вартість обладнання та встановлення.

3. Відсутність уніфікованих методик порівняльного аналізу для різних конфігурацій СЕС.

4. Обмеженість ресурсів (фінансових, технічних, експертних) для проведення глибоких досліджень.

5. Залежність продуктивності від кліматичних умов.

Виявлено такі можливості:

1. Розробка та впровадження сучасних моделей і інструментів для аналізу ефективності СЕС, адаптованих під регіональні особливості.

2. Підвищення рівня довіри інвесторів і користувачів до СЕС завдяки об’єктивним рекомендаціям.

3. Залучення державних і міжнародних грантів на дослідження та розвиток відновлюваної енергетики.

4. Можливість створення платформи або сервісу для підбору оптимальних конфігурацій СЕС із урахуванням регіональних кліматичних особливостей.

Виявлено такі загрози:

1. Бойові дії та нестабільна ситуація в країні.

2. Нестабільність кліматичних умов, що ускладнює моделювання.

3. Конкуренція з боку інших джерел енергії, які можуть отримувати більшу підтримку.

4. Можливі збої в енергомережі або проблеми з інтеграцією гібридної станції до існуючої інфраструктури.

5. Обмежена кваліфікація персоналу для проєктування та обслуговування таких систем.

6. Коливання цін на обладнання.

1.8 Аналіз зацікавлених сторін у розвитку домашніх сонячних електростанцій

У табл. 1.1. представлена класифікація стейкхолдерів.

Таблиця 1.1 - Ключові стейкхолдери сфери сонячної енергетики

№	Стейкхолдер	Роль / Інтерес у темі СЕС
1.	Кабінет Міністрів України (КМУ)	Забезпечення енергетичними ресурсами. Адаптація стратегічних планів по лінії європейської інтеграції. Забезпечення кібербезпеки. Забезпечення стійкості критичної інфрастуркутри.
2.	Верховна Рада України (ВРУ)	Законодавче регулювання. Імплементація законодавства в частині енергетики.
3.	Міненерго	Забезпечення роботи енергетичної системи. Відновлення енергетичного сектору.
4.	НКРЕКП (Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг)	Забезпечення регулювання процесів. Балансування можливостей споживачів. Забезпечення дотримання ліцензійних умов в частині економічних питань.
5.	РНБО (Рада національної безпеки і оборони України)	Контроль за процесами в енергетичній безпеці. Контроль розподілу ресурсів.
6.	Міносвіти	Підготовка профільних кадрів для енергетики. Співпраця з енергетичними підприємствами для забезпечення компетентними кадрами.

Продовження табл. 1.1

7.	ОМС (Органи місцевого самоврядування)	Безперебійне постачання енергоресурсів. Розробка, впровадження регіональних програм. Забезпечення ресурсів для автономності громад.
8.	Громадські організації	Громадський контроль. Вплив та участь в частині ухвалення рішень.
9.	Міжнародні інституції (ЄС, *NATO* тощо)	Надійність України як партнера. Реалізація міжнародних проєктів на Україні. Перехід на стандарти ЄС.
10.	Бізнес-організації (виробники/інсталятори СЕС)	Перехід на ВДЕ. Отримання прибутку.

Основних бенефіціарів наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Основні бенефіціари проєктів у сфері СЕС

№	Бенефіціар	Потреби / Вигоди
1.	Споживачі енергоносіїв (фізичні особи)	Безперебійне, надійне та якісне енергопостачання. Економічна доступність. Справедливий розподіл енергетичних ресурсів.
2.	Споживачі енергоносіїв (юридичні особи)	Безперебійне, надійне енергопостачання. Економічна доступність та справедливий процес встановлення тарифів.
3.	Виробники енергоносіїв	Отримання прибутку від впровадження СЕС. Прозорі та зрозумілі процедури.
4.	Суб'єкти енергоринку	Відновлення та стійкість. Отримання прибутку. Ефективне законодавче регулювання.

Продовження табл. 1.2

5.	Працівники енергетичної сфери	Безпека та соціальний захист. Бронювання працівників. Заробітна плата.

Розуміння потреб стейкхолдерів і бенефіціарів є ключовим чинником успішності проєкту, оскільки дозволяє оптимально узгодити технічні рішення, економічні розрахунки та організаційні процеси з реальними очікуваннями та пріоритетами всіх залучених сторін.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведений аналіз показав основні виклики галузі, зокрема недостатню нормативну підтримку, високі початкові витрати та обмеження централізованої енергетики. Аналіз регуляторного середовища в Україні та країнах ЄС показав, що імплементація сучасних європейських норм і стандартів створює сприятливі умови для розвитку малої та розподіленої генерації.

Дослідження можливостей децентралізованої енергетики та *SWOT*-аналіз проблеми підвищення ефективності домашніх СЕС дозволили систематизувати фактори, що потребують оптимізації, та визначити пріоритетні напрями впровадження інноваційних рішень. Аналіз інтересів зацікавлених сторін підкреслив важливість інтеграції технічних, економічних та соціальних аспектів для успішного розвитку приватної сонячної генерації.

Таким чином, результати проведеного аналізу слугуватимуть теоретичною та методологічною основою для моделювання різних сценаріїв з метою підвищення ефективності роботи гібридної СЕС у програмному середовищі *PVsyst* у наступних розділах.

РОЗДІЛ 2 ОПИС ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Характеристика приватного домогосподарства

Досліджуване приватне домогосподарство розташоване в межах міста Чернівці та являє собою сучасний двоповерховий індивідуальний житловий будинок, спроєктований для комфортного проживання середньої родини. Планувальна структура будівлі формує збалансований простір житлових та допоміжних приміщень: на першому поверсі розташовано простору вітальню, кухню з обідньою зоною, санвузол та прибудований одномісний гараж, тоді як другий поверх займають три спальні та додатковий санвузол.

Загальна опалювана площа будівлі становить орієнтовно 150–160 м², що відповідає рівню енергоспоживання приватних домоволодінь такого типу.

Будинок обладнано двосхилим дахом з кутом нахилу 38°, що є придатним для встановлення дахових фотоелектричних модулів у кліматичних умовах Чернівців. Орієнтовна площа південного схилу становить приблизно 90–100 м², що забезпечує достатній резерв корисної площі для розміщення масиву сонячних панелей. Саме ця площа дозволяє інтегрувати 18 монокристалічних фотомодулів сумарною площею близько 48,6 м², які розташовуються у трьох паралельних рядах (4 + 7 + 7 модулів) відповідно до геометрії даху. Такий формат монтажу забезпечує ефективне використання доступної площі та мінімальні затінення протягом року (рис. 2.1).

За результатами моделювання в програмному середовищі *PVsyst* [40], середньодобове побутове електроспоживання будинку становить 12,3 кВт·год/добу, що відповідає річному об'єму використаної енергії на рівні приблизно 4,5 МВт·год/рік. З урахуванням потреб споживачів, сезонних коливань навантаження та наявності декількох енергетичних зон у будівлі

(житлові кімнати, кухня, вентиляція, побутова техніка) виникає необхідність у встановленні високоефективної системи децентралізованого електропостачання.

Для повного покриття енергоспоживання домогосподарства та забезпечення можливості роботи як у режимі самоспоживання, так і в режимі продажу надлишкової електроенергії до мережі, планується впровадження дахової гібридної СЕС потужністю 10,98 кВт. Система працює з використанням трифазного електроживлення 380 В, що узгоджується з потужністю інвертора та вимогами до приєднання приватних СЕС у домогосподарствах, які використовують механізм «зеленого тарифу». Додатково передбачено застосування акумуляторної батареї (АКБ) з метою підвищення автономності та ефективності добового енергобалансу.

Рисунок 2.1 - Візуалізація приватного будинку з розміщенням сонячних панелей на даху

2.2 Вибір програмного середовища *PVsyst*

Для моделювання роботи дахової гібридної фотоелектричної станції використано програмне забезпечення *PVsyst* версії 8.0.18, яке є одним із найпоширеніших професійних інструментів для проєктування та аналізу фотоелектричних установок. Програма дозволяє моделювати мережеві, автономні та гібридні системи з урахуванням реальних кліматичних даних, технічних

характеристик обладнання, електричних втрат і споживання електроенергії.

Вибір програмного забезпечення *PVsyst* зумовлений його високою точністю, широкими можливостями параметризації та наявністю вбудованих баз даних для проєктування СЕС. Програма містить інтегровану кліматичну базу *Meteonorm* 8.2, що забезпечує достовірні багаторічні дані про інсоляцію, температуру та інші атмосферні показники, які враховані під час моделювання умов міста Чернівці. *PVsyst* дає змогу детально аналізувати втрати в системі (температурні, оптичні, електричні, через забруднення модулів), розраховувати коефіцієнт продуктивності *PR*, визначати сезонну ефективність та оцінювати поведінку інвертора та АКБ у різних режимах роботи.

Крім того, *PVsyst* має вбудований інструментарій для економічного аналізу, що дозволяє обчислити ключові фінансові показники фотоелектричної системи: *LCOE*, термін окупності, чисту приведену вартість *(NPV)*, рентабельність інвестицій *(ROI)* та річну доходність у разі продажу надлишкової електроенергії за «зеленим тарифом». Це робить *PVsyst* універсальним інструментом, який охоплює не лише інженерні, а й економічні аспекти проєкту.

2.3 Кліматичні умови, інсоляційні показники та вихідні метеодані для моделювання

2.3.1 Сонячний потенціал території України

Щоб обґрунтувати вибір приватної сонячної електростанції, доцільно розглянути загальний сонячний потенціал України. На рис. 2.2 наведено карту сонячного потенціалу, підготовлену Світовим банком і компанією *Solargis* [41].

Південна частина країни має найвищий рівень сонячної активності (до 1387 кВт·год/кВт на рік), тоді як у західних та центральних областях значення становлять 1050–1200 кВт·год/кВт, що є достатнім для встановлення приватних мережевих та гібридних СЕС. Для м. Чернівці середньорічна інсоляція складає близько 1200 кВт·год/м²·рік, що узгоджується з даними *Meteonorm* 8.2 та вказує на високий потенціал використання фотоелектричних систем.

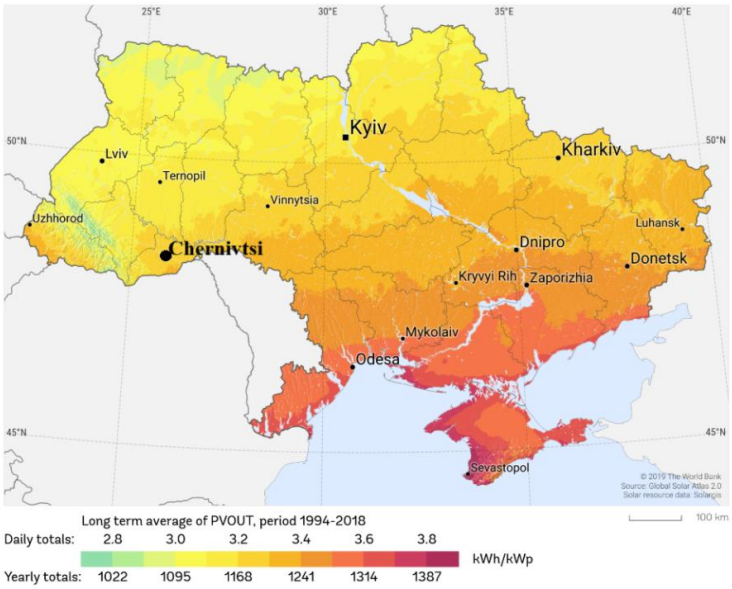


Рисунок 2.2 – Карта сонячної інсоляції України

2.3.2 Метеорологічні дані за базою *Meteonorm*

Для моделювання продуктивності фотоелектричної системи було використано стандартний кліматичний файл *Meteonorm* 8.2, імпортований у програмне забезпечення *PVsyst*. На рис. 2.3 наведено місячні значення глобальної та дифузної радіації, середні температури повітря, швидкості вітру, показника мутності атмосфери *(Linke turbidity)* та відносної вологості для м. Чернівці.

	Global horizontal irradiation	Horizontal diffuse irradiation	Temperature	Wind Velocity	Linke turbidity	Relative humidity
	kWh/m²/mth	kWh/m²/mth	°C	m/s	[-]	%
January	31.2	18.5	-3.0	3.10	2.728	81.4
February	46.0	22.5	-1.7	3.30	2.990	81.0
March	91.1	48.3	3.8	3.61	3.375	71.5
April	133.9	56.7	10.1	3.50	4.111	65.5
May	163.3	78.3	15.7	3.11	3.698	65.8
June	171.9	89.8	18.9	3.10	3.530	69.5
July	184.4	84.5	21.3	2.89	3.686	66.3
August	159.9	72.9	20.7	2.59	3.727	66.2
September	110.1	52.5	14.8	2.71	3.367	72.4
October	68.4	35.9	9.0	2.80	3.079	76.9
November	33.5	20.1	4.1	3.11	2.876	82.7
December	24.0	15.4	-1.2	3.10	2.719	84.2
Year	**1217.7**	**595.4**	**9.4**	**3.1**	**3.324**	**73.6**

Рисунок 2.3 – Місячні кліматичні дані для м. Чернівці за базою Meteonorm 8.2

На основі цих даних можна зробити розгорнутий аналіз кліматичних та

інсоляційних умов м. Чернівці, які визначають потенційну ефективність роботи фотоелектричної системи.

Перш за все, звертає на себе увагу виражена сезонність глобальної горизонтальної інсоляції *(GHI)*. Упродовж року значення змінюються у широкому діапазоні: від 24.0 кВт·год/м² у грудні до 184.4 кВт·год/м² у липні, що вказує на суттєву залежність продуктивності СЕС від пори року. Така динаміка характерна для помірно-континентального клімату України та є типовою для західного регіону країни. Високі літні показники інсоляції забезпечують максимальні значення генерації у червні–серпні, тоді як зимові місяці є малопродуктивними, що потребує компенсації споживанням із мережі або використанням акумуляторної батареї.

Річне значення *GHI* у 1217.7 кВт·год/м² підтверджує належність Чернівців до регіонів із достатнім сонячним потенціалом для ефективного використання приватних фотоелектричних систем.

Дифузна складова випромінювання *(DHI)* становить 595.4 кВт·год/м² на рік, тобто майже 49% від загальної інсоляції. Така пропорція є типовою для регіонів із помірною хмарністю та вказує, що значна частка сонячної енергії до поверхні досягає не у вигляді прямого, а у вигляді розсіяного випромінювання. Це впливає на ефективність модулів і зменшує залежність продуктивності від точного орієнтування панелей, що є додатковою перевагою для будинків зі складною геометрією даху.

Температурний профіль також має важливе значення для роботи СЕС. Середньорічна температура повітря становить 9.4 °C, а сезонні коливання — від –3.0 °C (січень) до 21.3 °C (липень).

Низькі середньорічні температури є сприятливими для фотоелектричних модулів, оскільки в умовах охолодженого повітря втрати від перегріву зменшуються, а напруга на панелях залишається вищою.

Середньорічна швидкість вітру на рівні 3.1 м/с забезпечує природне охолодження модулів і сприяє зниженню температурних втрат, що особливо актуально в літній період із високими значеннями сонячного випромінювання.

Показник мутності атмосфери *Linke turbidity (LT)* коливається протягом року, досягаючи максимальних значень у весняні місяці (4.111 у квітні), що пов'язано зі збільшенням вмісту пилу та аерозолів у повітрі.

Вищі значення *LT* зменшують кількість прямого випромінювання, однак водночас підвищують частку дифузної радіації. Для *PV*-систем це означає зниження пікової генерації, але збереження помірної стабільності в умовах мінливої хмарності.

Відносна вологість повітря, середнє значення якої становить 73.6%, підтверджує загальну тенденцію до м'яких і достатньо вологих зим і помірно теплих літ. Висока зимова вологість та нижчі температури сприяють зниженню прозорості атмосфери та більшій частці дифузної компоненти, що ще раз підтверджує сезонне зменшення продуктивності СЕС.

2.4 Структурна схема гібридної сонячної електростанції

Структурна схема гібридної електростанції на рис. 2.4 демонструє взаємодію основних компонентів, що забезпечують виробництво, перетворення, накопичення та розподіл електричної енергії в межах приватного домогосподарства. Система працює на основі трифазного гібридного інвертора з вихідною напругою 380 В, який інтегрує функції мережевого інвертора, контролера заряду та керування акумуляторною батареєю.

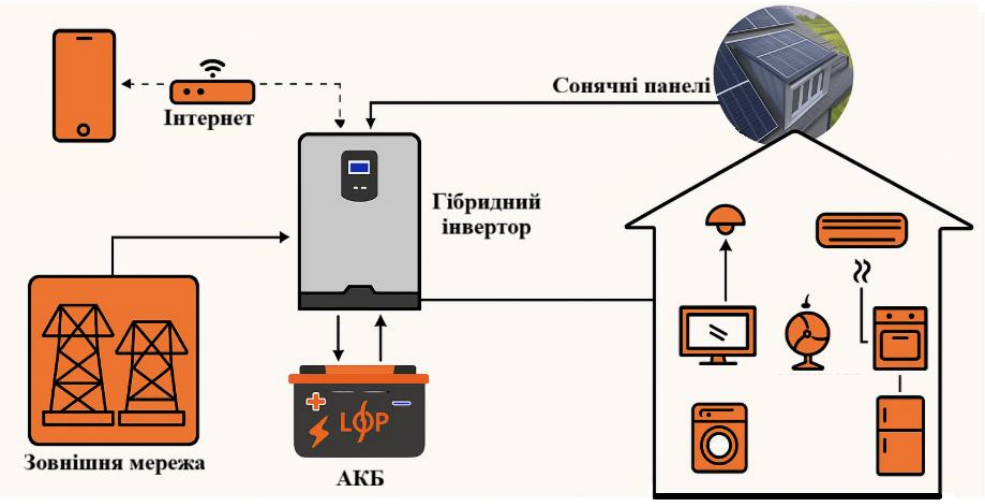


Рисунок 2.4 - Структурна схема гібридної фотоелектричної системи

Основним джерелом енергії є сонячні панелі, встановлені на даху будинку. Вони здійснюють перетворення сонячної радіації у постійний струм *(DC)*. Згенерована енергія подається на гібридний інвертор трифазного типу, який оснащений *MPPT*-контролером для відстеження точки максимальної потужності кожного масиву послідовно з'єднаних модулів та оптимізації виробітку фотоелектричного масиву.

Гібридний інвертор виконує одразу кілька ключових функцій:

1) перетворення постійного струму від сонячних модулів у змінний трифазний струм 380 В, необхідний для живлення побутових споживачів;

2) керування зарядом та розрядом акумуляторної батареї;

3) синхронізація роботи з зовнішньою електромережею;

4) забезпечення резервного живлення у разі зникнення напруги в мережі.

Акумуляторна батарея (АКБ) накопичує надлишкову енергію у період високої сонячної активності. Після заходу сонця або в години пікового навантаження інвертор використовує енергію АКБ для підтримання живлення критичних побутових приладів — освітлення, холодильника, вентилятора, електроніки, а за потреби й інших споживачів. Такий режим підвищує автономність і покращує добовий енергобаланс домогосподарства.

Система також підключена до зовнішньої електромережі, що дозволяє:

1) покривати дефіцит енергії у періоди низької генерації;

2) передавати надлишки виробленої електроенергії в мережу відповідно до нормативів «зеленого тарифу»;

3) забезпечувати гарантоване живлення всієї будівлі у випадку розрядження АКБ або несприятливих погодних умов.

Для контролю та оптимізації роботи система оснащена модулем смарт-моніторингу, що функціонує через інтернет. Користувач може за допомогою смартфона або ноутбука:

1) переглядати поточну генерацію СЕС;

2) контролювати рівень заряду акумуляторів;

3) відстежувати потоки енергії між інвертором, мережею та споживачами;

4) аналізувати статистику виробленої та спожитої електроенергії;

5) отримувати аварійні сповіщення про роботу обладнання.

Запропонована схема забезпечує надійне та гнучке енергопостачання приватного домогосподарства, дає змогу зменшити залежність від зовнішньої мережі, підвищити енергоефективність будинку та оптимізувати витрати на електроенергію. Компонування системи повністю відповідає вимогам трифазного підключення приватних СЕС потужністю понад 10 кВт.

2.5 Методика моделювання еталонної гібридної електростанції в програмному забезпеченні PVsyst

Методика моделювання еталонної фотоелектричної системи в програмному середовищі *PVsyst* складається з низки послідовних етапів, кожен з яких забезпечує повноту та достовірність розрахунків. Основні кроки моделювання включають:

2.5.1 Вибір типу фотоелектричної системи

Під час проєктування фотоелектричної установки для приватного домогосподарства було обрано конфігурацію гібридної СЕС *(Grid-connected with storage)*. Такий тип системи поєднує роботу від мережі та власної генерації, а також включає акумуляторну батарею для забезпечення часткової автономності.

Вибір саме гібридної конфігурації зумовлений такими факторами:

1. Нестабільність електропостачання та необхідність резервування.

В умовах частих аварійних відключень електроенергії критично важливо забезпечити живлення основних побутових навантажень, тому система має працювати в режимі резерву *(backup)*. Гібридний інвертор дозволяє підтримувати роботу при відсутності мережі, на відміну від класичного мережевого інвертора.

2. Можливість самоспоживання.

Система працює за принципом пріоритетного використання власної сонячної генерації, що дозволяє знижувати обсяг електроенергії, спожитої з мережі, та оптимізувати витрати домогосподарства.

3. Інтеграція акумуляторної батареї.

Гібридна архітектура дає змогу накопичувати надлишкову денну генерацію

та використовувати її у вечірні години, коли споживання традиційно максимальне. Це зменшує пікове навантаження на мережу та підвищує коефіцієнт самоспоживання.

4. Робота з двонаправленим лічильником.

Система підтримує можливість передачі надлишкової електроенергії в мережу у разі перевищення генерації над власним споживанням.

5. Узгодженість із конфігурацією *PVsyst*.

Програмне середовище *PVsyst* містить готову структурну модель *Grid-connected with storage*, що дозволяє: коректно описати потік енергії між *PV*-масивом, батареєю, навантаженням та мережею; моделювати роботу *MPPT*-контурів; визначати рівень самоспоживання та енергообмін з мережею.

2.5.2 Двонаправлений лічильник електроенергії та його роль у гібридний сонячній станції

Двонаправлений лічильник електроенергії — це спеціалізований засіб обліку, який застосовується у домогосподарствах із сонячними електростанціями, підключеними до мережі. На відміну від традиційних електролічильників, що реєструють лише споживання електроенергії, двонаправлений прилад здатний вимірювати енергію в обох напрямках: енергію, отриману з мережі та енергію, що повертається в мережу з приватної СЕС.

Це дозволяє точно визначати баланс виробітку та споживання, що є ключовим для схем компенсації, таких як «зелений тариф» та механізми нет-мітерингу. Такий лічильник забезпечує повну прозорість взаєморозрахунків між власником СЕС та оператором системи розподілу.

У гібридних системах, де одночасно працюють сонячні панелі, акумуляторна батарея та мережа, двонаправлений лічильник є критично важливим елементом, оскільки дозволяє враховувати як власну генерацію, так і імпорт мережевої енергії у моменти нестачі сонячного виробітку.

Двонаправлений лічильник електроенергії забезпечує повноцінний контроль обмінних процесів між приватним домогосподарством і зовнішньою

електромережею. Він одночасно фіксує споживання електроенергії з мережі у ті періоди, коли власної генерації або заряду акумуляторної батареї недостатньо, та окремо реєструє обсяг електроенергії, який передається від гібридної СЕС назад у мережу у разі наявності надлишкового виробітку. Таким чином, прилад формує два незалежні масиви даних — імпорт та експорт електроенергії, що дозволяє точно визначати енергетичний баланс будинку.

Передача зібраної інформації до оператора системи розподілу здійснюється через інтегровані комунікаційні інтерфейси, такі як *PLC*-зв'язок, оптичний порт або, у деяких моделях, радіоканал. Це забезпечує автоматизоване та дистанційне зчитування показів, мінімізує ймовірність помилок і спрощує процес контролю.

На основі зареєстрованих даних оператор здійснює розрахунки вартості спожитої електроенергії, визначає компенсацію за передані в мережу надлишки та формує загальний енергетичний баланс відповідно до чинної моделі взаємозаліку. У разі роботи за «зеленим тарифом» оплаті підлягає саме обсяг електроенергії, експортований споживачем до мережі, що робить двонаправлений лічильник ключовим елементом інтеграції приватної СЕС в енергосистему [42].

На рис. 2.5 зображено базову структурну схему СЕС з двонаправленим лічильником.

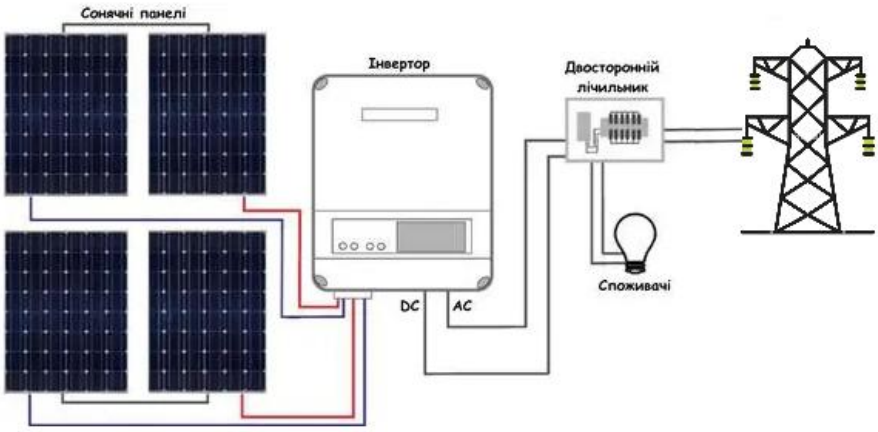


Рисунок 2.5 - Блок-схема гібридної СЕС з двонаправленим лічильником

У проєктованій гібридній СЕС загальною потужністю 10.98 кВт, що працює разом з трифазним інвертором номінальною потужністю 10 кВт, застосування

трифазного двонаправленого лічильника є не лише оптимальним, а й обов’язковим вимогою оператора системи розподілу.

Це пояснюється тим, що:

1) трифазний інвертор передає енергію по трьох фазах;

2) баланс потоків імпорту та експорту має обліковуватися окремо для кожної фази;

3) коректна робота схеми взаєморозрахунків можлива лише за наявності трифазного двонаправленого засобу обліку.

Таким чином, для забезпечення відповідності нормативам та стабільної роботи системи саме трифазний лічильник є єдино правильним рішенням.

2.5.3 Завдання орієнтації фотоелектричного поля

Орієнтація фотоелектричного масиву є одним із ключових параметрів, що визначають рівень сонячного випромінювання, яке надходить на поверхню модулів, а відповідно — річний енергетичний виробіток системи. У цьому дослідженні орієнтацію масиву визначено відповідно до геометрії даху приватного будинку та рекомендацій для кліматичних умов України.

У програмному середовищі *PVsyst* для моделювання обрано такі параметри (рис. 2.6):

1) кут нахилу площини модуля *(Tilt)* — 40°, що відповідає оптимальному діапазону для Чернівецької області та забезпечує максимальний річний виробіток;

2) азимут *(Azimuth)* — 0°, що у системі координат *PVsyst* відповідає орієнтації на південь *(South)*.

Варто зазначити, що у *PVsyst* використовується власна система відліку азимуту: 0° відповідає південному напрямку, тоді як у географічній системі координат аналогічний напрямок задається як 180°. Візуальна схема в *PVsyst* підтверджує, що при азимуті 0° фотоелектрична площина точно спрямована на південь.

Тип монтажу — даховий *(roof-mounted)*, на двосхилому даху з розміщенням

панелей на південній площині. Така конфігурація забезпечує рівномірне надходження сонячного випромінювання протягом дня та мінімальні сезонні втрати.

Для оцінки інсоляції на площині модуля *PVsyst* застосовує модель Переса *(Perez model)*, яка враховує: пряму складову сонячного випромінювання; дифузну складову небесної півсфери; відбиту складову від поверхні землі.

Завдяки цьому забезпечується точний розрахунок річного енергетичного потенціалу фотоелектричного масиву та впливу орієнтації на кінцевий виробіток системи.

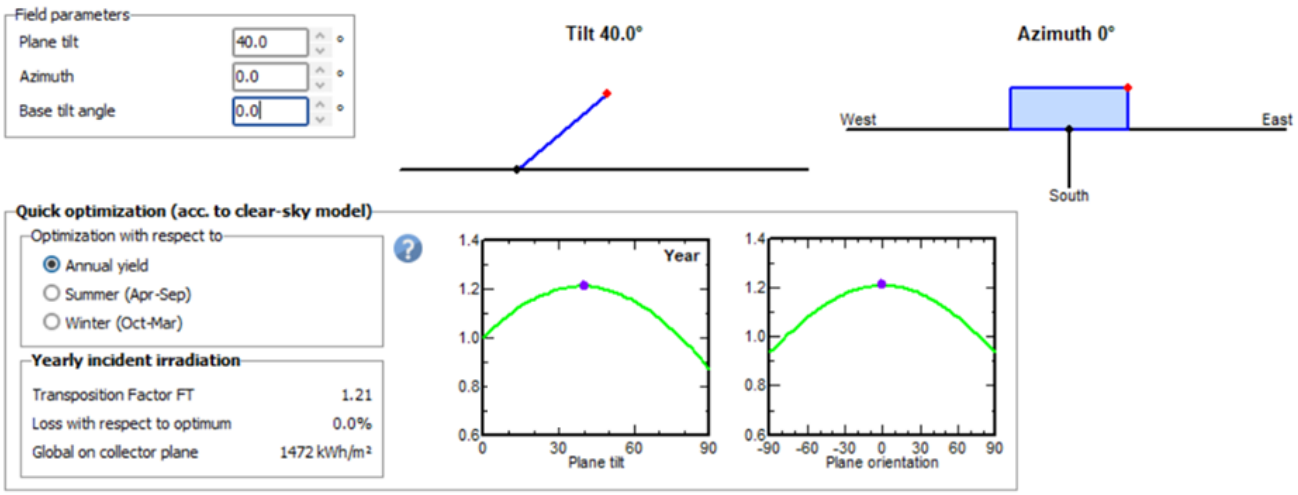


Рисунок 2.6 - Вікно налаштування орієнтації фотоелектричного поля в *PVsyst*

2.5.4 Імпорт технічних характеристик обладнання

На етапі моделювання гібридної сонячної електростанції в *PVsyst* до проєкту були імпортовані всі необхідні технічні параметри основного обладнання: фотоелектричних модулів, інвертора та АКБ. Коректне введення цих даних забезпечує реалістичність моделі та достовірність подальших енергетичних розрахунків.

Спочатку було обрано монокристалічні модулі *Longi LR7-72HTH-610M* [43]. Їх характеристики були імпортовані з внутрішньої бази даних *PVsyst*, що гарантує повну відповідність параметрів сертифікаційним *STC*-даним виробника.

Основні параметри модулів, які імпортуються *PVsyst* зображено на рис. 2.7:

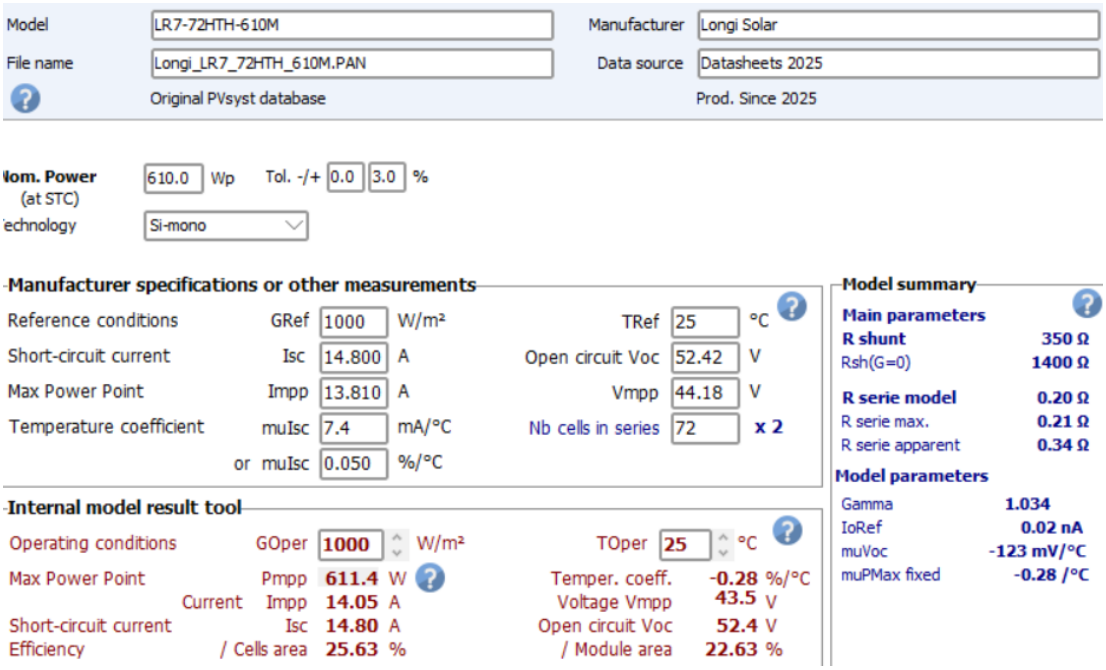


Рисунок 2.7 – Характеристика сонячних панелей *Longi LR7-72HTH-610M*

Окрім базових електричних параметрів, важливо зазначити, що вибрані модулі належать до сучасної технології *HPBC (Hybrid Passivated Back Contact)*. Це одна з найінноваційніших архітектур кремнієвих фотоелементів, у якій усі струмозбірні шини та більшість контактів перенесено на тильний бік фотоелемента. Відсутність металізації на лицьовій поверхні дає змогу практично повністю усунути затінення активної області, що безпосередньо підвищує загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) модуля.

Технологія *HPBC* поєднує елементи задньоконтактних структур та високоефективної пасивації, що властива сучасним високопродуктивним фотоелектричним технологіям. Її ключовими перевагами є повна відсутність затінення лицьової поверхні металізацією, знижені втрати на поверхневу рекомбінацію, підвищена напруга холостого ходу, кращий фактор заповнення та оптимізований струмозбір. Завдяки цьому модулі *HPBC* демонструють кращу роботу за низьких рівнів освітленості, зниження впливу часткового затінення, а також покращену температурну стабільність і довгострокову надійність.

Далі було обрано трифазний гібридний інвертор *Deye SUN-10K-SG04LP3-EU* [44] з двома незалежними *MPPT*-входами. Його характеристики зображено на

рис. 2.8. Саме два незалежні *MPPT* дали можливість підключити два стринги різної довжини: 11 модулів на перший *MPPT* та 7 модулів на другий.

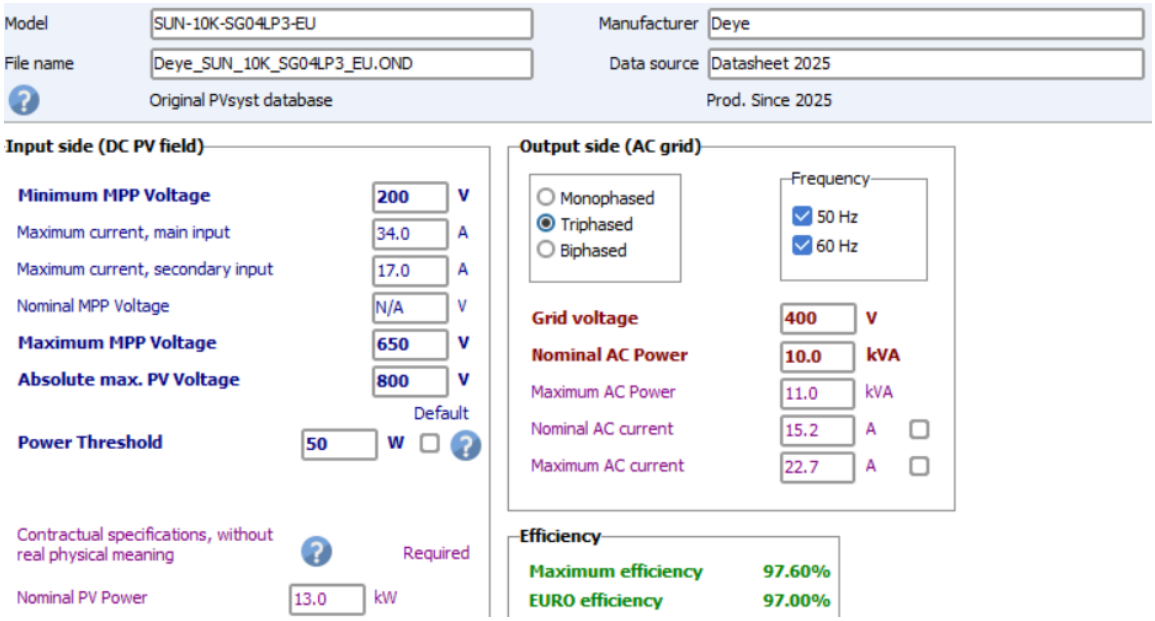


Рисунок 2.8 – Характеристика гібридного інвертора *Deye SUN-10K-SG04LP3-EU*

Одним із ключових параметрів, що визначають продуктивність гібридної фотоелектричної системи, є ефективність роботи інвертора. Для оцінки його реальної ефективності було проаналізовано залежність ККД від рівня вхідної постійної потужності, представлену на рис. 2.9.

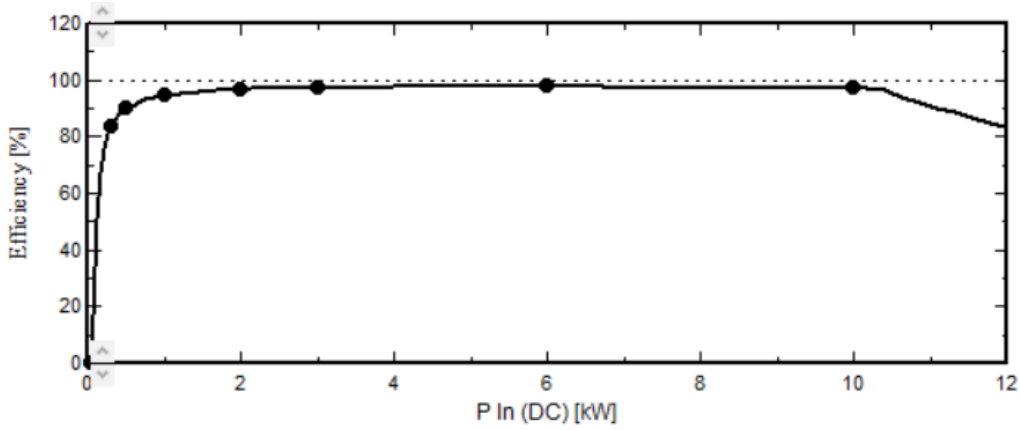


Рисунок 2.9 - Залежність ККД інвертора від вхідної потужності

При навантаженні до 0.2–0.3 кВт інвертор демонструє порівняно низьку ефективність, що зумовлено переважанням власного енергоспоживання

електронних компонентів над корисною потужністю, яка проходить через перетворювач. Це є типовою особливістю усіх мережевих та гібридних інверторів і має незначний вплив у реальних умовах роботи, оскільки мале навантаження для домогосподарства зустрічається рідко.

Після досягнення рівня вхідної потужності близько 0.5–1 кВт ККД стрімко зростає до значень 98–99 %, що відповідає оптимальному режиму роботи інвертора. У цьому діапазоні втрати на комутацію та власні споживання мінімізуються, що забезпечує максимально ефективне перетворення енергії від сонячного масиву.

У зоні середнього та високого навантаження (2–10 кВт) інвертор працює стабільно, зберігаючи ефективність на рівні 97–99 %, що є характерним для сучасних трифазних інверторів із високовольтною *DC*-шиною. Лише при наближенні до номінального навантаження (≈10–11 кВт) спостерігається незначне спадання ККД, зумовлене зростанням теплових та комутаційних втрат.

З графічної залежності видно, що інвертор досягає максимальних показників ефективності при роботі в середньому діапазоні потужностей, що повністю узгоджується з характеристиками фотоелектричного масиву 10.98 кВт. Таким чином, інвертор працює в оптимальній зоні протягом більшої частини року, що позитивно впливає на загальну генерацію та коефіцієнт продуктивності системи.

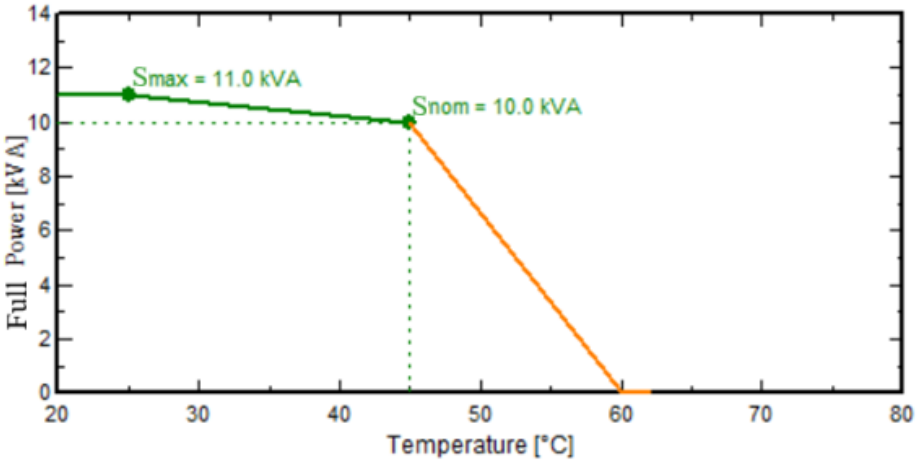


Рисунок 2.10 - Температурний дерейтинг інвертора *Deye SUN-10K-SG04LP3-EU*

На рис. 2.10 подано температурний дерейтинг інвертора, який показує, як змінюється доступна вихідна потужність залежно від умов нагріву. До температури приблизно 40 °C інвертор може працювати на рівні максимально доступної повної потужності, що відповідає короткочасному піковому навантаженню. У точці близько 45 °C крива переходить до номінального режиму, після чого починається поступове зниження можливої вихідної потужності.

У діапазоні температур вище 50 °C спостерігається виражений дерейтинг: інвертор обмежує роботу для уникнення перегріву силових модулів. При наближенні до температури ≈60 °C його вихідна потужність може зменшуватися практично до нуля, що є типовою особливістю захисту для інверторів цього класу. Така характеристика важлива з практичної точки зору, оскільки демонструє, в яких умовах теплонавантаження інвертор зберігає повну потужність, а коли починає її обмежувати.

Після цього було застосовано літій-залізо-фосфатну батарею *BslBatt* ємністю 5.12 кВт·год [45] з такими характеристиками на рис. 2.11:

PVsyst TRIAL

Grid storage - Self-consumption

Battery		**Battery input charger**	
Manufacturer	Generic	Model	Generic
Model	B-LFP48 48-100E	Max. charging power	3.25 kWdc
Battery pack		Max./Euro effic.	97.0 / 95.0 %
Nb. of units	1 unit	**Battery to Grid inverter**	
Voltage	51 V	Model	Generic
Nominal Capacity (C10)	100 Ah	Max. discharging power	3.20 kWac
Nominal energy	5.12 kWh	Max./Euro effic.	97.0 / 95.0 %
Operating SOC limits	95.0 / 20.0 %		
Useable energy	3.84 kWh		
Operating temperature	Fixed 20 °C		

Рисунок 2.11 – Параметри АКБ *BslBatt B-LFP48 48-100E*

Ці параметри дозволяють змоделювати коректний режим *Self-consumption*, що забезпечує: зберігання денних надлишків генерації, вечірнє покриття частини навантаження, зменшення пікових навантажень на мережу.

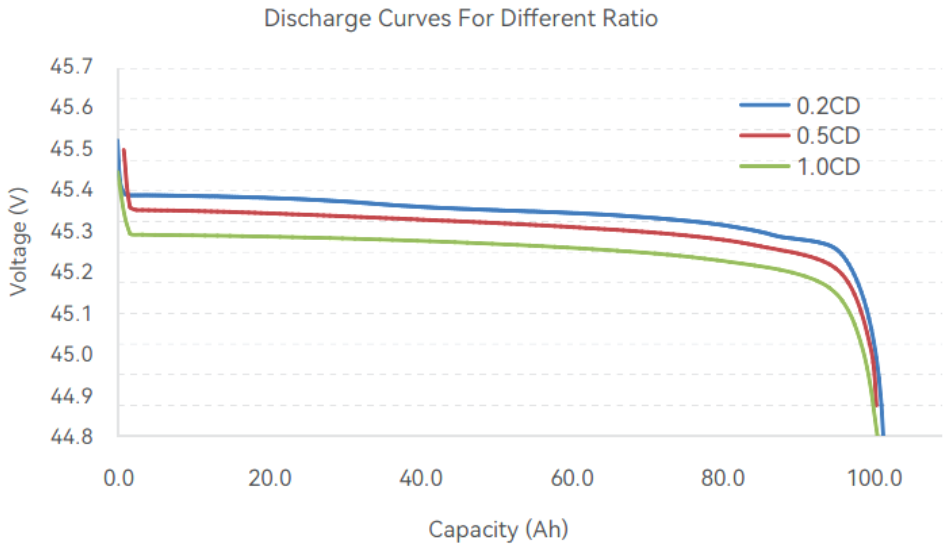


Рисунок 2.12 - Вольт-амперні характеристики АКБ при розряді на різних струмах [46]

На рис. 2.12 зображено розрядні характеристики літій-залізо-фосфатної батареї ємністю 100 А·год при різних значеннях розрядного струму — 0.2CD, 0.5CD та 1.0CD. Криві демонструють типову для $LiFePO_4$-хімії поведінку: напруга залишається стабільною в широкому діапазоні від 5 % до 95 % рівня заряду *(SOC)*, а спад напруги наприкінці розряду відбувається різко, що вказує на високу якість елементів осередків.

При збільшенні розрядного струму спостерігається закономірне зменшення робочої напруги внаслідок зростання внутрішніх втрат та посиленої поляризації. Зокрема, крива при 1.0CD проходить нижче за криву 0.2CD на 30–40 мВ протягом більшої частини діапазону розряду, хоча форма кривої залишається подібною. Це підтверджує високий ступінь стабільності батареї навіть під підвищеним навантаженням.

Різниця у віддачі ємності між режимами 0.2CD і 1.0CD мінімальна — усі три криві досягають майже 100 А·год перед точкою різкого падіння напруги. Таким чином, батарея демонструє низьку залежність доступної ємності від струму розряду, що є важливою перевагою для гібридних фотоелектричних систем, де навантаження може змінюватися імпульсно (вмикання побутових приладів, пікові вечірні навантаження). Отримані характеристики підтверджують

відповідність АКБ вимогам системи, у якій потрібна стабільність напруги та передбачувана поведінка при змінних режимах роботи.

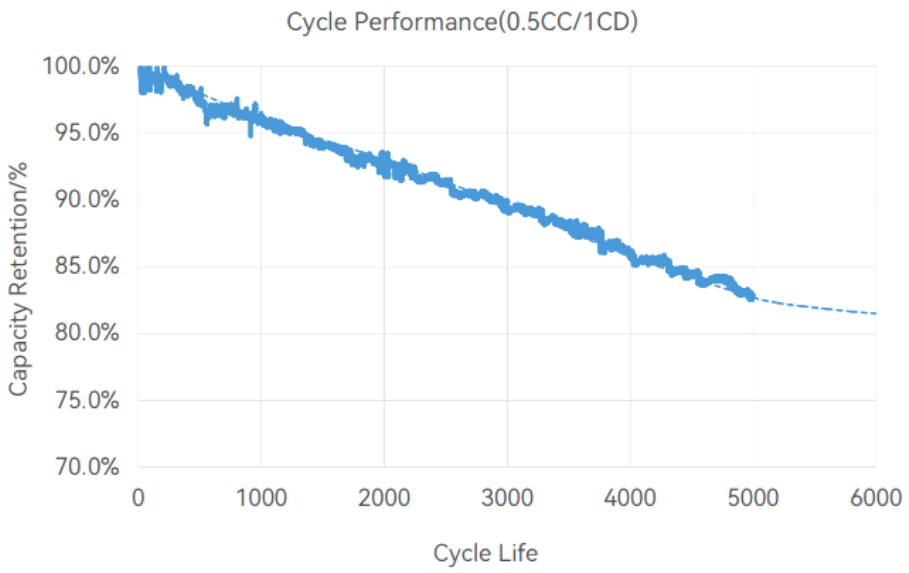


Рисунок 2.13 - Деградація ємності АКБ протягом життєвого циклу [46]

Рис. 2.13 відображає зміну залишкової ємності $LiFePO_4$ батареї протягом тривалого циклічного навантаження (заряд 0.5CC, розряд 1CD). Показано, як реальна ємність акумулятора поступово зменшується внаслідок фізико-хімічних процесів старіння, що є неминучими для будь-якої електрохімічної системи.

На початку експлуатації батарея демонструє 100 % номінальної ємності, однак у міру збільшення кількості циклів спостерігається плавне, лінійне зниження показника. Після приблизно 3000 циклів ємність зменшується до рівня близько 90 %, а по досягненні 6000 циклів — до ≈80 %. Це відповідає типовим характеристикам сучасних $LiFePO_4$-батарей, що вирізняються підвищеною стабільністю та тривалим терміном служби порівняно з іншими літієвими технологіями.

Враховуючи стандартну експлуатацію гібридної СЕС (один цикл на добу або менш), планшет показує потенційну тривалість роботи батареї понад 10–15 років до досягнення 80 % залишкової ємності, що узгоджується з паспортними даними виробника. Таким чином, показаний графік підтверджує високу довговічність АКБ та її економічну доцільність, оскільки деградація відбувається повільно й

прогнозовано, а збереження високої ємності упродовж більшої частини життєвого циклу забезпечує стабільну ефективність гібридної сонячної електростанції.

Після імпорту даних *PVsyst* автоматично перевіряє: відповідність робочої напруги кожного стрингу діапазону *MPPT*, максимальний струм для кожного входу, можливість роботи інвертора з різною довжиною стрингів, відсутність перевищення V_{oc} у зимових температурах

У результаті система отримала статус **«OK»**, що підтверджує правильність обраної електричної конфігурації.

Висновки до розділу 2

На основі аналізу характеристик приватного домогосподарства встановлено, що його архітектурні та енергетичні параметри повністю відповідають вимогам до встановлення дахової СЕС. Кліматичні умови м. Чернівці, визначені за даними *Meteonorm 8.2* та картою сонячного потенціалу *Solargis*, підтвердили наявність достатнього інсоляційного ресурсу, який забезпечує доцільність впровадження фотоелектричної системи.

Обґрунтований вибір програмного середовища *PVsyst* 8.0.18 дозволив отримати достовірну основу для моделювання завдяки точним алгоритмам розрахунку втрат, підтримці *MPPT*-контурів, моделюванню роботи акумуляторної батареї та можливості виконання економічного аналізу. Додатково було імпортовано технічні характеристики фотоелектричних модулів, інвертора та АКБ, що забезпечило відповідність моделі реальним умовам експлуатації.

У межах розділу сформовано структурну схему гібридної СЕС з трифазним інвертором 380 В, яка поєднує сонячні панелі, акумуляторний модуль, зовнішню електромережу та систему смарт-моніторингу. Опис потоків енергії та взаємодії компонентів дав змогу визначити ключові функціональні можливості системи,

включаючи самоспоживання, резервне живлення та роботу з двонаправленим лічильником.

Таким чином, у цьому розділі було сформовано повноцінну базу для подальшого дослідження продуктивності системи. Описані характеристики будинку, проаналізовані кліматичні умови, виконано імпорт технічних параметрів обладнання та побудовано структурну модель системи, що дозволяє перейти до наступного етапу — порівняльного аналізу різних сценаріїв конфігурації фотоелектричної установки, впливу параметрів модулів, кута нахилу та рівня забруднення поверхні на річну генерацію, які будуть детально розглянуті у наступному розділі.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ПРОДУКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Аналіз факторів, що впливають на ефективність роботи фотоелектричних систем

Перед безпосереднім розглядом результатів комп'ютерного моделювання гібридної СЕС виникає необхідність визначити та систематизувати ключові фактори, що формують її продуктивність. Показники річної генерації, коефіцієнта продуктивності *PR*, сезонних втрат чи впливу забруднення не можуть бути проаналізовані коректно без попереднього розуміння причинно-наслідкових зв'язків, які визначають ефективність роботи фотоелектричних систем.

Для комплексного розуміння причин змінної продуктивності СЕС у різних регіонах України проведено аналіз факторів за методикою діаграми Ісікави *(Fishbone diagram)*. Ця методика дозволяє систематизувати проблеми за категоріями та сформувати можливі шляхи їх вирішення. Діаграма класифікує фактори за шістьма основними напрямами: інфраструктурні, організаційні, технологічні, економічні, людські та екологічні.

Інфраструктурні фактори відображено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Інфраструктурні фактори

№	Фактори-проблеми	Рішення
1.	Невідповідна форма, орієнтація або кут нахилу даху. У випадку приватних будинків часто зустрічаються складна форма даху, наявність мансардних вікон, різний кут нахилу.	1. Інтегровані *BIPV*-модулі *(Building-Integrated Photovoltaics)*. 2. Наземні конструкції *(ground-mounted)*: встановлення панелей на окремих металевих стійках, коли дах непридатний.

Продовження табл. 3.1

		3. Регульовані монтажні системи: кронштейни, які дозволяють змінити кут нахилу панелей до оптимального (30–40°). 4. *PV*-карпорти та навіси: використання навісів над авто чи терасою як додаткової площі.
2.	Затінення від елементів інфраструктури. Джерелами затінення можуть бути дерева, димові труби, вентиляційні виходи, сусідні будинки, мансардні вікна або навіть скупчення снігу.	1.*3D*-моделювання тіней. 2.Оптимізатори потужності. 3. Панелі з підвищеною кількістю байпас-діодів, що знижують вплив затінення на весь стринг. 4. Розбиття масиву панелей на секції. 5. Корекція розміщення елементів даху.
3.	Поганий стан електричних мереж будинку. Старі алюмінієві кабелі, зношені автомати, окиснені контакти та нестабільна напруга часто стають причиною аварійних відключень, перегріву інвертора або виходу з ладу обладнання.	1. Повний електротехнічний аудит будинку. 2. Заміна ввідного кабелю на кабель більшого перерізу згідно навантаження. 3. Встановлення реле контролю напруги та перенапруги для захисту інвертора. 4. Повна модернізація щитка (*DIN*-рейки, шини заземлення, окремі групи). 5. Перехід на трифазне підключення для потужностей понад 10 кВт.
4.	Вентиляційний зазор та конструктивні вимоги до монтажу. потужність падає на 10–20%.	1. Використання високо-профільних кронштейнів. 2. *BIPV* + теплові канали. 3. Добір модулів із низьким температурним коефіцієнтом.

Продовження табл. 3.1

5.	Відсутність захисної інфраструктури (заземлення, блискавкозахист)	1. Створення якісного контуру заземлення відповідно до ДСТУ. 2. Встановлення пристрій захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП). 3. Встановлення системи вирівнювання потенціалів *(Equipotential bonding)*.
6.	Перевантажені або низькоякісні місцеві електромережі	1. Інвертори з широким робочим діапазоном. 2. Крокові стабілізатори або автотрансформатори для вирівнювання напруги.
7.	Обмежена площа даху або низька несуча здатність конструкцій	1. Панелі підвищеної питомої потужності (550–710 Вт), що зменшує площу встановлення. 2. Полегшені монтажні системи з алюмінію. 3. Встановлення на незалежні конструкції (навіс, земля, огорожа). 4. *PV*-карпорти, терасні навіси або перголи як додаткові площі.
8.	Недоступність або обмеження приєднання до електромережі	1. Обмеження експорту *(export limiter)*. 2. Повністю автономні або напівавтономні системи *(off-grid / hybrid-offgrid)*.

Після узагальненого аналізу інфраструктурних факторів доцільно зупинитися детальніше на окремих цікавих технологіях, які:

1. Технологія *BIPV (Building-Integrated Photovoltaics)* передбачає інтеграцію фотоелектричних модулів безпосередньо в огороджувальні конструкції будівлі —

дах, фасад або світлопрозорі елементи. У цьому випадку сонячні панелі виконують функції генерації електроенергії та замінюють традиційні будівельні матеріали (металочерепицю, бітумну черепицю, керамічну плитку тощо). На рис. 3.1 зображено відмінності між навісними фотоелектричними модулями *(BAPV)* та будівельно-інтегрованими модулями.

Рисунок 3.1 - Відмінності між *BAPV* та *BIPV* [47]

Основною перевагою *BIPV* є можливість повної інтеграції фотоелектричних модулів у будівлю без використання додаткових монтажних конструкцій. Оскільки модулі замінюють традиційні покрівельні матеріали, це частково знижує витрати на облаштування даху та усуває проблеми, пов’язані з аеродинамічними навантаженнями. Крім того, *BIPV* дають можливість реалізувати сонячну енергетику навіть на дахах складної форми.

Водночас *BIPV* мають і певні обмеження. Насамперед це вища вартість у порівнянні з традиційними рішеннями та складніший монтаж. Одним із ключових обмежень *BIPV* є відсутність природного вентиляційного зазору, що призводить до підвищення робочої температури модулів і, відповідно, до зростання температурних втрат. Але для мінімізації цього ефекту застосовують спеціальні теплові канали *(ventilated air channels)*, інтегровані у конструкцію даху.

2. Оптимізатори потужності — це електронні пристрої, які встановлюються

на окремі фотоелектричні модулі та забезпечують незалежне відстеження точки максимальної потужності *(MPPT)* для кожної панелі. Завдяки цьому сонячні панелі можуть працювати з максимально можливою ефективністю навіть у разі часткового затінення, забруднення або нерівномірного старіння окремих модулів. Модулі з вбудованими оптимізаторами часто називають «смарт-модулями».

Оптимізатори особливо ефективні на об’єктах із нерівномірною освітленістю, де втрати можуть виникати через тінь від дерев, димоходів, сусідніх будівель, забруднення фрагментів поверхні або відмінності у характеристиках панелей. У таких умовах оптимізатори дозволяють підвищити загальну генерацію станції на 10–20 %, оскільки запобігають зниженню струму всього стрингу через одну менш продуктивну панель.

Принцип роботи оптимізатора на рис. 3.2 полягає у підтриманні індивідуального *MPPT* кожного модуля. Якщо одна панель тимчасово генерує менше струму, оптимізатор компенсує це, не даючи знизитися струму всього ланцюга [48].

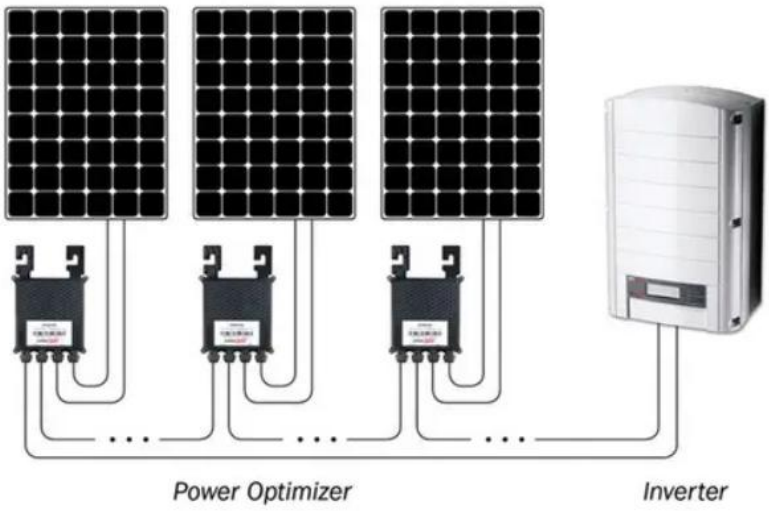


Рисунок 3.2 - Принципова схема підключення оптимізаторів потужності [48]

3. Байпасний діод — це напівпровідниковий елемент, який проводить електричний струм лише в одному напрямку (рис. 3.3). У фотоелектричних модулях він виконує функцію захисту в умовах часткового затінення. Оскільки для нормальної роботи сонячного модуля важливо, щоб уся його активна

поверхня рівномірно отримувала сонячне випромінювання, навіть короткочасне затінення окремої ділянки призводить до зниження вихідної потужності приблизно на 20–30 % та появи зон локального перегріву *(hot-spot)*.

Щоб запобігти пошкодженню осередків у таких умовах, у конструкцію панелі інтегрують кілька байпасних діодів (зазвичай 3–4), кожен із яких підключений паралельно певній групі фотоелементів.

Рисунок 3.3 - Байпасні діоди в розподільній коробці фотомодуля [49]

4. ПЗІП — це спеціалізований захисний пристрій, який встановлюється у фотоелектричних системах для запобігання пошкодженню обладнання внаслідок імпульсних перенапруг. Такі перенапруги виникають через грозові розряди, атмосферні індукції або перемикальні процеси в мережі. У разі їх появи ПЗІП відводить надлишок енергії в землю та захищає сонячні панелі, інвертор, контролери та кабельні лінії. Табл. 3.2 містить систематизацію типів ПЗІП для СЕС із коротким описом функціональних властивостей та областей використання кожного типу [50].

Таблиця 3.2 - Типи УЗДП для сонячних електростанцій

Тип / Опис	Призначення
Клас I	Призначений для відведення струмів прямого удару блискавки та високих імпульсних перенапруг (до 100 кА).

Продовження табл. 3.2

Клас II	Основний захист устаткування від індукованих атмосферних та комутаційних перенапруг. Найчастіше використовується в приватних СЕС.
Клас III	Точний захист — фінальний бар'єр перед чутливим обладнанням.

Технологічні фактори відображено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Технологічні фактори

№	Проблема	Рішення
1.	Старе/зношене обладнання	1. Стимулювати використання панелей з гарантією 25+ років. 2. Створення програми *trade-in* в Україні для заміни старих модулів на нові зі знижкою.
2.	Низька якість матеріалів	1. Обов’язкове підтвердження сертифікатів *IEC*. 2. Створення публічного рейтингу постачальників.
3.	Деградація матеріалів	1. Використання *bifacial* панелей. 2. Технології *PERT*, *PERL*, *PERC*, *TOPCon* та *HJT*. 3. Захисні покриття та очищення від забруднень.
4.	Перегрів панелей та теплові втрати (*hot-spot*, високі температурні коефіцієнти)	1. Застосування модулів із низьким температурним коефіцієнтом. 2. Формування вентиляційного зазору або теплових каналів для природного охолодження. 3. Регулярне очищення та усунення локальних причин перегріву (пил, листя, часткове затінення).
5.	Нестабільна робота *MPPT* та інвертора	1. Використання інверторів із кількома незалежними *MPPT*-трекерами і коректне компонування стрінгів. 2. Регулярні оновлення прошивки та моніторинг.

1. Двостороння *(bifacial)* сонячна батарея — це фотоелектричний модуль зі спеціальною напівпрозорою або повністю прозорою тильною поверхнею, що дає змогу перетворювати сонячну енергію не лише з фронтального боку, а й із задньої сторони.

На відміну від традиційних панелей із суцільною непрозорою задньою підкладкою, двосторонній модуль використовує відбиту й розсіяно-дифузну радіацію від поверхонь під собою (грунту, бетону, білого даху, щебеню), що підвищує загальну ефективність системи.

Завдяки такій конструкції додаткова генерація може становити від 5 до 30 %.

Згідно з даними *ITRPV* (2020) на рис. 3.4, частка біфасіальних сонячних модулів демонструє швидке зростання: з приблизно 15 % у 2019 році до прогнозованих 70 % у 2030 році. Водночас частка традиційних монофасіальних модулів поступово зменшується. Така тенденція пов’язана з вищою ефективністю двосторонніх панелей, зростанням їх доступності та масштабним переходом виробників на технології *PERC, TOPCon, HJT* та інші, адаптовані під біфасіальні рішення [51].

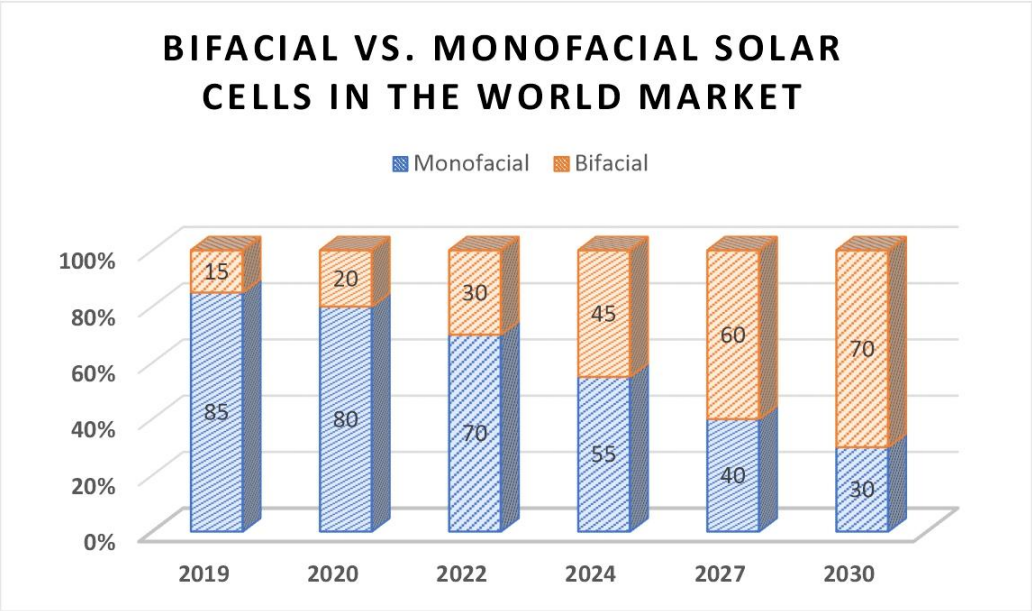


Рисунок 3.4 – Прогноз розвитку світового ринку монофасіальних та біфасіальних сонячних елементів згідно з *ITRPV* [51]

2. Технології *PERC, PERT, PERL, TOPCon, HIT/HJT* та *IBC*.

На сьогодні технологія *PERC (Passivated Emitter Rear Contact)* є однією з наймасовіших у фотоелектричній промисловості: приблизно чверть усіх нових сонячних модулів у світі виготовляється саме на її основі. Популярність *PERC* пояснюється оптимальним балансом між вартістю та ефективністю.

На відміну від базових кристалічних кремнієвих елементів, *PERC*-панелі мають додатковий пасивуючий шар на тильній стороні, який зменшує рекомбінацію носіїв заряду та покращує відбиття світла назад у комірку. Завдяки цьому ККД модуля зростає приблизно з 16 % до 18–20 %, без суттєвого ускладнення технологічного процесу чи збільшення вартості виробництва.

Переваги *PERC*-модулів: вища продуктивність при обмеженій площі; краща робота за умов низької освітленості; менший температурний коефіцієнт і нижча деградація; збільшений добовий вихід енергії.

Технологія *PERT* будується переважно на пластинах n-типу, які мають довший час життя носіїв та не схильні до деградації, індукованої світлом (*LID*). Тильна поверхня тут повністю дифузійна.

Переваги *PERT*: вищий ККД порівняно з *p-type PERC*; підвищена стабільність і довговічність; хороша сумісність із двосторонніми (*bifacial*) модулями.

PERL є подальшим розвитком *PERC*: дифузія на тильній стороні виконується локально, що мінімізує втрати на рекомбінацію та дозволяє досягати дуже високих значень ККД.

Переваги *PERL*: потенціал ККД 22–24 %; мінімальні рекомбінаційні втрати; можливість застосування у високопродуктивних двосторонніх модулях.

TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) є еволюційним розвитком *PERC* і базується на поєднанні тонкого тунельного оксиду та високоякісних пасивованих контактів.

Ключові переваги *TOPCon*: ККД 22–24 % у промислових модулях; дуже низькі втрати на рекомбінацію; повна сумісність із *n-type*, що виключає *LID*; висока двосторонність і стабільність.

HJT — це гібридна структура, яка поєднує кристалічний кремній та тонкі шари аморфного кремнію.

Переваги *HJT*: ККД у промисловому виробництві до 24–25 %; найнижчий температурний коефіцієнт серед масових технологій; дуже висока двосторонність — 90–95 %; відсутність деградації *LID* і *PID*.

У технології *IBC (Interdigitated Back Contact)* всі контакти перенесені на тильну сторону елемента. Завдяки цьому лицьова поверхня повністю відкрита для світла.

Переваги *IBC*: дуже високий ККД — 23–25+ %; повна відсутність затінення металевими шинками; потенціал для двосторонності при оптимізованій тильній поверхні; використання *n-type* пластин забезпечує високу стабільність роботи.

Організаційні фактори відображено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Організаційніні фактори

№	Фактори-проблеми	Рішення
1.	Відсутність гарантійної та страхової політики	1. Запровадження пакета «СЕС під ключ» із включеною страховкою. 2. Розробка державних або муніципальних програм субсидування страхування для домогосподарств. 3. Контракти на щорічне обслуговування СЕС. 4. *SMS/Push*-нагадування про технічний огляд.
2.	Брак місцевих програм підтримки	1. Створення інформаційних центрів СЕС у громадах. 2. Впровадження програм навчання для ОСББ

Продовження табл. 3.4

3.	Бюрократичні перешкоди під час приєднання до мереж	1. Цифровізація процесів (електронний кабінет з формуванням реєстру встановлених СЕС). 2. Скорочення строків погодження для СЕС.

Представлена таблиця узагальнює основні організаційні перепони, що виникають під час впровадження СЕС. Запропоновані рішення спрямовані на спрощення процедур підключення, посилення місцевої підтримки та забезпечення гарантійного й страхового захисту користувачів, що загалом підвищує доступність і надійність СЕС для домогосподарств.

Економічні фактори відображено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 - Економічні фактори

№	Фактори-проблеми	Рішення
1.	Термін окупності	1. Оптимізація конфігурації СЕС з урахуванням тарифів, профілю навантаження та вартості обладнання. 2. Застосування інструментів фінансового моделювання (*PVsyst, SAM*) для прогнозування строку окупності. 3. Використання державних програм підтримки, «зелених» тарифів, пільгового кредитування.
2.	Недостатня фінансова підтримка	1. Організація кооперативних закупівель для отримання гуртових знижок. 2. Використання лізингових механізмів для зменшення стартових витрат.
3.	Дорогий монтаж	1. Розвиток ринку кваліфікованих монтажників. 2. Створення навчальних центрів для підготовки спеціалістів зі встановлення СЕС.

Продовження табл. 3.5

4.	Висока вартість обслуговування	Упровадження сервісної моделі «обслуговування за підпискою» з фіксованою вартістю та регулярними технічними оглядами (1–2 рази на рік).

Програма “теплі кредити” — державна ініціатива, що підтримує енергоефективні заходи, включно з встановленням сонячних панелей. Програма передбачає компенсацію частини тіла кредиту, що робить її вигідною для приватних домогосподарств та малого бізнесу.

1. Кредитні програми від “Укргазбанку” та “Ощадбанку” — пропонують спеціалізовані умови для фінансування проєктів ВДЕ, зокрема СЕС. Вони включають пільгові відсоткові ставки, довгострокове фінансування та спеціальні пропозиції для бізнесу.

2. Програма “Зелене фінансування” від ПриватБанку — спрямована на підтримку бізнесу різного масштабу у впровадженні енергоефективних рішень і ВДЕ, пропонуючи вигідні умови кредитування.

3. Міжнародні фінансові інститути (Європейський банк реконструкції та розвитку, Світовий банк) забезпечують додаткові можливості фінансування, особливо для більших проєктів, що стимулює розвиток ВДЕ в Україні [52].

Людські фактори відображено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 - Людські фактори

№	Фактори-проблеми	Рішення
1.	Поганий вибір конфігурації СЕС	Використання попереднього моделювання у *SAM*, або *PVsyst* для підбору оптимальної конфігурації.
2.	Недостатній досвід користувача	Розроблення відеоінструкцій, мобільних застосунків із нагадуваннями та проведення навчальних вебінарів/практикумів постачальниками обладнання.

Продовження табл. 3.6

3.	Недостатня кваліфікація	Запровадження сертифікації та ліцензування для фахівців, що займаються проєктуванням СЕС.
4.	Ігнорування локальних кліматичних умов	Проведення попереднього мікрокліматичного аналізу (рівень пилового забруднення, особливості рельєфу, орієнтації даху).
5.	Помилки під час монтажу обладнання	Підготовка монтажників через навчальні центри, стандартизація монтажних процедур, авторський технічний нагляд за встановленням.
6.	Відсутність регулярного технічного обслуговування	Укладання договорів на сервісне обслуговування, впровадження системи попереджувальних оглядів та автоматичних нагадувань для користувача.

Представлена таблиця демонструє ключові людські помилки, що найчастіше виникають під час вибору, проєктування, монтажу та експлуатації СЕС. Запропоновані рішення спрямовані на те, щоб зменшити вплив цих факторів шляхом навчання користувачів, підвищення кваліфікації фахівців та впровадження регламентованих процедур обслуговування.

Екологічні фактори відображено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 - Екологічні фактори

№	Фактори-проблеми	Рішення
1.	Часті погодні явища (дощ, град, сильний вітер)	1. Використання антистатичних та гідрофобних покриттів на панелях. 2. Вибір модулів із високим ступенем *IP*-захисту та сертифікацією на вітер/сніг.

Продовження табл. 3.7

2.	Довготривале ультрафіолетове випромінювання	Застосування панелей зі склом, стійким до ультрафіолетової деградації та використання захисних задніх листів.
3.	Забруднення (пил, пташиний послід, промислові викиди)	1. Встановлення систем автоматичного очищення (щітки, мікродощування). 2. Використання сіток, антипташиних конструкцій.
4.	Корозійні середовища (біля соляних доріг, промзон)	1. Використання панелей із антикорозійною рамою (*anodized aluminium*), нержавіючим кріпленням. 2. Регулярний огляд і очищення від соляних відкладень.

Представлена таблиця відображає важливі екологічні фактори, які суттєво впливають на експлуатаційну ефективність фотоелектричних систем в Україні. Часті та різноманітні погодні явища, такі як дощ, сніг, пилові бурі, можуть знижувати продуктивність панелей та прискорювати їх знос. Впровадження антистатичних і гідрофобних покриттів, а також вибір панелей з високим ступенем *IP*-захисту, сприяють підвищенню стійкості обладнання до негативних зовнішніх факторів.

Ультрафіолетове випромінювання є ще одним фактором деградації матеріалів панелей, тому використання скла з покращеним захистом від ультрафіолетових випромінювання променів значно подовжує строк служби системи.

Забруднення, зокрема пил та пташиний послід, створюють додаткові проблеми, знижуючи ефективність перетворення сонячної енергії. Автоматизовані системи очищення і спеціальні накладки або сітки допомагають

підтримувати поверхню панелей у чистоті та зменшувати технічне обслуговування.

3.2 Ключові фактори, що підлягають детальному аналізу

Серед усіх категорій, розглянутих у діаграмі Ісікави, найбільш суттєвий вплив на результати моделювання фотоелектричної системи справляють інфраструктурні, технологічні та економічні фактори. Саме вони визначають реальні величини річної генерації, коефіцієнта продуктивності *PR*, сезонних втрат, а також інвестиційну привабливість проєкту.

1. Інфраструктурні фактори. Ця група охоплює умови монтажу та взаємодію системи з елементами будівлі та локальної інфраструктури: кут нахилу даху, орієнтацію площини, рівень затінення, стан електромережі будинку, якість вентиляції панелей та наявність захисних елементів (заземлення, ПЗІП, блискавкозахист). Зміна цих параметрів безпосередньо відображається на річному енергетичному виході системи та значенні коефіцієнта *PR*, що чітко простежується у результатах моделювання в *PVsyst*.

2. Технологічні фактори. До технологічних належать характеристики самих фотоелектричних модулів та інверторів: тип технології (*PERC, TOPCon, HJT* тощо), температурний коефіцієнт, рівень деградації, робота *MPPT*-трекерів, наявність оптимізаторів потужності та байпасних діодів. Вони визначають ефективність системи за високих температур, нерівномірної освітленості та впродовж тривалого строку служби, формуючи величину втрат і значення коефіцієнта продуктивності.

3. Економічні фактори. Економічні фактори пов’язані з початковими інвестиціями, строком окупності, доступністю кредитних та лізингових програм, вартістю монтажу й обслуговування. Саме вони визначають, наскільки обрана конфігурація СЕС є фінансово доцільною для конкретного домогосподарства. У подальшому аналізі використовуються результати фінансового моделювання та наявні в Україні програми підтримки для оцінки *LCOE*, строку окупності та інвестиційних ризиків.

4. Екологічні фактори. Екологічні фактори безпосередньо впливають на роботу фотоелектричних модулів у реальних умовах експлуатації. До них належать погодні явища, рівень забруднення поверхні модулів, вплив ультрафіолету, агресивні середовища та сезонні зміни мікроклімату. Усі ці параметри формують втрати типу *Soiling Loss, Spectral Loss* та *Degradation Loss,* які *PVsyst* частково розраховує автоматично, але їх величина залежить від конкретних умов місцевості.

Таким чином, ці фактори доцільно виділити як ключові для детального аналізу в подальших підрозділах, оскільки саме вони в найбільшій мірі пояснюють технічну продуктивність гібридної СЕС.

3.3 Аналіз змодельованих сценаріїв

Систематизація інфраструктурних, технологічних та економічних факторів створює необхідне підґрунтя для подальшого дослідження продуктивності гібридної фотоелектричної системи. Однак для кількісної оцінки їхнього реального впливу недостатньо лише теоретичного огляду: потрібен аналіз поведінки системи за різних конфігурацій, умов експлуатації та параметрів обладнання.

Саме тому наступним етапом дослідження є комп’ютерне моделювання у програмному середовищі *PVsyst*, що дозволяє відтворити роботу СЕС за різних початкових умов і визначити, які із зазначених факторів чинять найбільший вплив на річну генерацію, коефіцієнт продуктивності *PR*, рівень втрат, роботу акумуляторної батареї та економічні показники.

3.3.1 Теоретичні розрахункові співвідношення

У роботі використано стандартні показники ефективності фотоелектричних систем відповідно до рекомендацій сучасної літератури.

Питома потужність (*SP*) та питома генерація (*SY*) визначаються такими співвідношеннями [53]:

$$SP = \frac{P}{W_P}, \tag{3.1}$$

де P — фактична потужність системи або певний вихідний параметр (кВт);

W_P — встановлена (паспортна) потужність масиву панелей (кВт).

$$SY = \frac{E}{W_P}, \tag{3.2}$$

де E — річний виробіток електроенергії (кВт·год).

Коефіцієнт продуктивності характеризує відношення фактичної генерації до теоретично очікуваної та визначається як [54]:

$$PR = \frac{SP \cdot G_{POA}}{G_{STC}}, \tag{3.3}$$

де G_{POA}— інсоляція на площині модулів (кВт·год/м²);

G_{STC} — стандартна інсоляція 1000 Вт/м².

Для розрахунку опромінення на похилій площині використано трикомпонентну модель [55]:

$$H_G = R(\beta, \gamma) \cdot H, \tag{3.4}$$

де H_G — горизонтальне опромінення (кВт·год/м²).

Хоча *PVsyst* виконує економічний аналіз автоматично, загальний вираз для *LCOE* має вигляд [54]:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^{n} (C_t + O_t)}{\sum_{t=1}^{n} E_t}, \tag{3.5}$$

де C_t— капітальні витрати ($);

O_t — експлуатаційні витрати ($/рік);

E_t — річна генерація (кВт·год/рік).

3.3.2 Аналіз впливу технології фотоелектричних модулів на продуктивність системи

Перший етап моделювання було спрямовано на визначення того, яким чином вибір технології фотоелектричних модулів впливає на енергетичну продуктивність та економічні показники гібридної сонячної електростанції. Для

цього проведено порівняння двох найбільш поширених та доступних в Україні типів модулів — монокристалічних (*Mono-Si*) та полікристалічних (*Poly-Si*). Вибір між цими технологіями має ключове значення, оскільки саме параметри панелей визначають загальну ефективність системи, необхідну площу даху, рівень системних втрат та кінцеву величину річної генерації.

Монокристалічні модулі вирізняються підвищеною ефективністю, нижчими температурними втратами та більшою стабільністю електротехнічних параметрів у реальних умовах. Полікристалічні модулі, хоча й є економнішими, демонструють нижчу щільність потужності, що потребує збільшеної площі монтажу та призводить до нижчої енерговіддачі. Такі конструктивні та фізичні відмінності потенційно суттєво впливають на продуктивність гібридної СЕС у побутовому застосуванні.

Для коректності порівняння в програмному середовищі *PVsyst* було сформовано два ідентичні сценарії, що відрізнялися лише типом встановлених модулів. У кожному з них використовувалися однакові кліматичні дані *Meteonorm* для м. Чернівці, однакові параметри орієнтації фотоелектричного поля (кут нахилу 40°, азимут 0°), один і той самий профіль навантаження домогосподарства (середньодобове споживання 12.3 кВт·год), однакова конфігурація інвертора, АКБ та система втрат. Це дозволило повністю виключити зовнішні чинники та оцінити виключно вплив технології панелей.

Результати моделювання наведено в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 - Порівняння монокристалічних і полікристалічних модулів.

Показник	*Mono-Si*	*Poly-Si*
Потужність одного модуля, Вт	610	350
Кількість модулів	18	30
Загальна потужність масиву, кВт	10.98	10.50
Ефективність модуля, %	22.63	17.23
Площа масиву, м²	48.6	61

Продовження табл. 3.8

Річна генерація, кВт·год	13 317	12 507
Питома генерація, кВт·год/кВт·рік	1 213	1 191
PR, %	85.12	83.59
SF, %	84.59	84.29
Вартість системи, $	6 184	7 050
LCOE, $/кВт·год	0.118	0.0876
Окупність, років	5.1	5.9

На основі отриманих даних встановлено, що при використанні монокристалічних модулів вдалося сформувати масив встановленою потужністю 10.98 кВт на площі лише 48.6 м². У випадку полікристалічних модулів для отримання близької потужності (10,50 кВт) необхідно було збільшити площу масиву до 61 м², що свідчить про істотну різницю у щільності потужності.

Також енергетичний аналіз показав, що річна генерація системи з монокристалічними модулями становить 13 317 кВт·год, що на 810 кВт·год більше, ніж у випадку з *Poly-Si* (12 507 кВт·год). Питома генерація також є вищою: 1213 проти 1191 кВт·год/кВт·рік. Вищий коефіцієнт продуктивності (*PR* = 85.12 % проти 83.59 %) свідчить про те, що монокристалічні модулі мають менші температурні та оптичні втрати і краще працюють за реальних умов інсоляції. Економічні показники також підтверджують перевагу технології *Mono-Si*. Хоча окрема полікристалічна панель є дешевшою, кінцева вартість масиву *Poly-Si* вища (7050 $ проти 6184 $), оскільки потребує значно більшої кількості модулів. Крім того, термін окупності для *Mono-Si* становить 5.1 років, тоді як для *Poly-Si* — 5.9 років. Тобто система на основі монокристалічних панелей генерує більше електроенергії при нижчій вартості встановлення та швидше повертає інвестиції. Підсумовуючи результати моделювання, можна однозначно стверджувати, що монокристалічні модулі забезпечують суттєво кращі технічні та економічні характеристики.

3.3.3 Аналіз впливу кута нахилу панелей на енергетичну ефективність

Кут нахилу фотоелектричних модулів є одним із ключових параметрів, що визначає річну генерацію сонячної електростанції. Від цього параметра залежить кількість сонячного випромінювання, що надходить на площину модулів протягом року, а також рівень сезонних коливань виробітку електроенергії. Згідно з рекомендаціями [54], оптимальний кут орієнтації панелей у помірному кліматі має корелювати з географічною широтою місцевості. Для західних регіонів України, включно з м. Чернівці, рекомендовані значення становлять 35–40°, що забезпечує максимальний річний прийом опромінення. Як зазначено в [53], зміна кута нахилу лише на 5° може впливати на річну генерацію в межах 2–4 %, що підтверджує високу чутливість системи до геометрії монтажу.

Для оцінки впливу цього параметра на роботу гібридної СЕС було проведено моделювання трьох конфігурацій з кутами нахилу 30°, 35° та 40°. Усі інші параметри — тип модулів (*Longi LR7-72HTH-610M*), азимут (0°), профіль навантаження домогосподарства, конфігурація інвертора та АКБ — залишалися незмінними, що забезпечило ізоляцію впливу саме геометричного фактора. Результати розрахунків наведено в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 - Результати моделювання залежно від кута нахилу

Кут нахилу, °	Річна генерація, кВт·год	Питома генерація, кВт·год/кВт·рік	*PR*, %	*SF*, %	*LCOE*, $/кВт·год	Окупність, р.
30°	13 237	1 206	84.91	84.95	0.1189	5.2
35°	13 317	1 213	85.03	84.79	0.1181	5.1
40°	13 317	1 213	85.12	84.59	0.1180	5.1

Отримані результати дозволяють зробити низку важливих висновків:

1. Вплив на питому генерацію. Найвищі значення питомої генерації — 1213 кВт·год/кВт·рік — досягнуті для кутів 35° та 40°. Це свідчить про оптимальний збіг площини модуля з напрямком максимального річного сонячного

випромінювання. При куті 30° питома генерація знижується до 1206 кВт·год/кВт·рік, що відповідає орієнтовним втратам 0.5–0.7 % і узгоджується з даними з літератури.

2. Зміна коефіцієнта продуктивності *PR*. *PR* збільшується зі зростанням кута нахилу — від 84.91 % для 30° до 85.12 % для 40°. Це пов'язано зі зменшенням кутових втрат *(IAM)* та зниженням частки дифузного випромінювання при більш вертикальному розміщенні в зимовий сезон.

3. Економічний ефект. Найменше значення собівартості електроенергії (*LCOE* = 0.1180 $/кВт·год) отримано для кута 40°, що робить його економічно найбільш доцільним. Термін окупності для варіантів 35° та 40° становить 5.1 року, що на 0.1 року краще, ніж при куті 30°.

Моделювання підтверджує, що оптимальним для кліматичних умов м. Чернівці є кут нахилу 35–40°. Обидва варіанти забезпечують максимальну річну генерацію та найкращі техніко-економічні показники. Значення 30° є менш ефективним та доцільне лише при конструктивних обмеженнях даху.

3.3.4 Аналіз впливу забруднення поверхні модулів на ефективність системи

Забруднення поверхні фотоелектричних модулів належить до найбільш поширених чинників, що призводять до поступового зниження ефективності СЕС. До складу забруднюючих нашарувань входять пил, пилок, органічні частинки, сажева фракція та інші дрібнодисперсні елементи, які накопичуються на скляному покритті модулів і погіршують їх оптичні властивості. Сучасні дослідження [56, 57] свідчать, що у регіонах із помірним кліматом, до яких належать і Чернівці, втрати генерації через soiling можуть становити 1–7 % на рік залежно від сезонності, інтенсивності пилового навантаження та регулярності очищення обладнання.

Механізм впливу забруднення полягає у зменшенні кількості сонячного випромінювання, що досягає робочої площини модуля. Забруднення знижує прозорість скла та спричиняє нерівномірне освітлення фотоелементів, що призводить до виникнення локальних затінених ділянок і зростання оптичних

втрат. Унаслідок цього зменшується інсоляція на площині модуля (*G_POA*), що безпосередньо впливає як на річний виробіток електроенергії, так і на коефіцієнт продуктивності *PR*, який є одним із ключових індикаторів загального стану системи.

Для оцінки масштабу впливу цього фактора було змодельовано три сценарії забруднення поверхні — 1 %, 2 % та 3 %. Усі інші характеристики системи (орієнтація, тип модулів, конфігурація стрингів, кліматичні дані та профіль навантаження) залишалися незмінними, що дозволило проаналізувати виключно вплив soiling. Результати наведено в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 - Вплив рівня забруднення поверхні модулів на показники роботи СЕС

Рівень soiling, %	Річна генерація, кВт·год	Питома генерація, кВт·год/кВт·рік	*PR*, %	*SF*, %	*LCOE*, $/кВт·год	Окупність, р.
1 %	13 185	1201	84.27	84.51	0.119	5.2 р.
2 %	13 053	1189	83.43	84.42	0.120	5.3 р.
3 %	12 983	1183	83.00	84.10	0.121	5.4 р.

Аналіз результатів показує, що збільшення рівня забруднення навіть у межах 1–3 % спричиняє помітне зниження енергетичних показників. Питома генерація зменшується від 1201 до 1183 кВт·год/кВт·рік, що практично еквівалентно втраті кількох повноцінних сонячних днів на рік. Оскільки специфічна генерація є інтегральним показником ефективності модулів, навіть така зміна відображає суттєвий вплив оптичних втрат на продуктивність системи. Подібна тенденція спостерігається і для коефіцієнта продуктивності *PR*, який знижується із 84.27 % до 83.00 %. У малопотужних приватних СЕС втрата навіть 1 % *PR* є небажаною, оскільки часто призводить до погіршення роботи інвертора у ранкові та вечірні години, коли система працює за межами оптимальних режимів.

Показник Solar Fraction змінюється менш виражено, однак при підвищенні забруднення до 3 % зменшується до близько 84.10 %, що означає зниження здатності станції забезпечувати покриття власного навантаження за рахунок власної генерації. Це підсилює залежність домогосподарства від електричної мережі у вечірні та нічні періоди, особливо в умовах використання акумуляторної батареї невеликої ємності.

Погіршення енергетичних параметрів неминуче відображається на економічних показниках. Рівень собівартості електроенергії *LCOE* зростає з 0.119 до 0.121 $/кВт·год, а термін окупності відповідно збільшується з 5.2 до 5.4 року. Хоча абсолютні значення різниці незначні, для побутових домогосподарств це означає додаткові фінансові втрати та зниження прогнозованої економічної ефективності проєкту на горизонті 10–15 років експлуатації.

Проведений аналіз підтверджує необхідність регулярного сезонного очищення панелей, особливо у період інтенсивного пилового навантаження влітку та під час тривалих сухих періодів. Забезпечення чистоти поверхні модулів дозволяє мінімізувати оптичні втрати, стабілізувати значення *PR* і *SF* та зберегти запроєктовані економічні показники станції.

3.4 Фінальний опис оптимізованої гібридної електростанції

На основі проведеної оптимізації та порівняння різних сценаріїв сформовано підсумкову конфігурацію гібридної фотоелектричної системи загальною потужністю 10.98 кВт. У її склад входять монокристалічні *n-type TOPCon* модулі *Longi LR7-72HTH-610M*, встановлені під оптимальним кутом нахилу 40°, гібридний трифазний інвертор із двома *MPPT*-трекерами та акумуляторна батарея ємністю 5.12 кВт·год. У такій конфігурації система демонструє річну генерацію 13 317 кВт·год за умов базового рівня забруднення поверхні 1 %, що дає змогу покривати близько 80–85 % середньодобового електричного навантаження домогосподарства (≈ 12.3 кВт·год/добу). Деталізовані значення втрат фотоелектричної системи за категоріями наведено у додатку А. Узагальнена діаграма енергетичних втрат СЕС наведена в додатку Б.

3.4.1 Коефіцієнт продуктивності

На рис. 3.5 наведено щомісячні значення коефіцієнта продуктивності PR, які протягом року залишаються у доволі вузькому діапазоні 0.84–0.87. Така рівномірність свідчить про стабільну роботу системи та високу відповідність робочих параметрів умовам моделювання. Невелике зниження *PR* у літні місяці пов'язане з підвищенням температури фотомодулів та відповідним збільшенням теплових втрат, тоді як взимку коефіцієнт покращується завдяки нижчій температурі та сприятливішим атмосферним умовам.

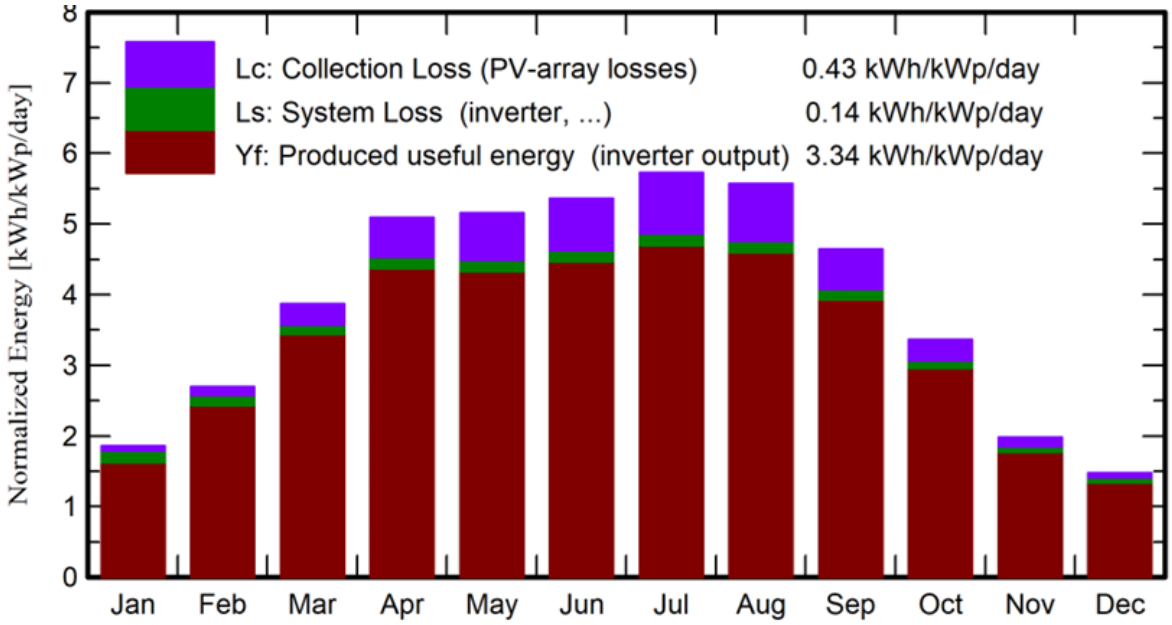


Рисунок 3.5 — Щомісячні значення коефіцієнта продуктивності *PR* для оптимізованої конфігурації

3.4.2 Енергетичний баланс

Аналіз помісячних результатів моделювання дає можливість глибше оцінити поведінку фотоелектричної системи протягом року та визначити ключові фактори, що впливають на її ефективність у реальних умовах експлуатації. Рис. 3.6 містить синтезовані кліматичні, енергетичні й експлуатаційні показники, які відображають як сезонні зміни інсоляції, так і реакцію системи на коливання температури, навантаження та рівень споживання.

Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_User kWh	E_Solar kWh	E_Grid kWh	EFrGrid kWh
January	31.2	18.48	-3.00	57.5	55.9	612	369	227	310	141.9
February	46.0	22.55	-1.72	75.5	73.3	794	333	218	517	115.3
March	91.1	48.31	3.77	119.9	115.7	1227	324	284	871	40.0
April	133.9	56.75	10.08	152.7	147.1	1522	313	296	1144	17.7
May	163.3	78.27	15.72	159.9	153.3	1564	324	319	1157	5.0
June	171.9	89.84	18.89	160.7	153.7	1562	478	470	1007	8.4
July	184.4	84.50	21.28	177.5	169.8	1705	494	487	1127	7.1
August	159.9	72.94	20.68	172.7	165.8	1668	494	483	1098	11.7
September	110.1	52.53	14.81	139.4	134.3	1375	328	301	1001	27.6
October	68.4	35.90	8.98	104.4	101.1	1060	339	280	717	59.6
November	33.5	20.11	4.05	59.3	57.5	615	328	229	337	99.4
December	24.0	15.39	-1.16	45.6	44.2	481	369	210	229	158.8
Year	1217.7	595.55	9.43	1425.0	1371.7	14185	4494	3802	9515	692.5

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation	EArray	Effective energy at the output of the array
DiffHor	Horizontal diffuse irradiation	E_User	Energy supplied to the user
T_Amb	Ambient Temperature	E_Solar	Energy from the sun
GlobInc	Global incident in coll. plane	E_Grid	Energy injected into grid
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings	EFrGrid	Energy from the grid

Рисунок 3.6 - Помісячний енергетичний баланс фотоелектричної системи

Перш за все, варто відзначити сезонний характер глобальної горизонтальної інсоляції *(GlobHor)*, що визначає доступний обсяг сонячної енергії. У літні місяці (травень–серпень) *GlobHor* досягає найбільших значень — 159.9–184.4 кВт·год/м², тоді як у зимовий період (грудень–січень) вона зменшується майже в 6–7 разів — до 24–31 кВт·год/м². Це безпосередньо впливає на генерацію масиву *(EArray)*: найнижчі значення — 481–612 кВт·год — припадають на період мінімальної інсоляції та короткого світлового дня.

Водночас помітним є те, що в найсонячніші літні місяці (червень, липень) система демонструє високі показники генерації — 1562–1705 кВт·год, однак максимального приросту енергії вдається досягти не лише за рахунок інсоляції, але й завдяки помірній динаміці температурних втрат. У таблиці чітко видно, що середня температура повітря *(T_Amb)* у липні становить 21.28°C, а в серпні — 20.68°C, що хоч і є відносно високими значеннями, але не настільки, щоб спричиняти суттєве падіння ефективності. Проте деяке зниження коефіцієнта *GlobEff* порівняно з *GlobInc* у цей період все ж підтверджує наявність

температурних обмежень, що узгоджується з кривою теплового дерейтінгу інвертора та характеристиками модулів.

Цікавою є також поведінка системи у перехідні сезони — березні, квітні та вересні. Саме ці місяці демонструють найбільш сприятливе співвідношення між інсоляцією та температурою: *T_Amb* у межах 3.8–14.8°C дозволяє фотомодулям працювати ближче до своїх номінальних умов, що приводить до високих значень ефективної інсоляції та стабільних показників *EArray*. Наприклад, у квітні, маючи *GlobInc* 152.7 кВт·год/м², система генерує 1522 кВт·год, що практично відповідає результатам літніх місяців. Це підкреслює важливу особливість: помірна температура є не менш критичним фактором ефективності, ніж кількість сонячної радіації.

Аналіз обсягів спожитої енергії *(E_User)* демонструє відносну рівномірність навантаження протягом року, що узгоджується з заданою добовою потребою 12.3 кВт·год. Незважаючи на сезонні коливання генерації, система здатна забезпечувати стабільний рівень покриття потреб домогосподарства. У літній період, коли *EArray* перевищує рівень споживання, зростає обсяг переданої до мережі енергії *(E_Grid)*: у червні–серпні він становить 1007–1127 кВт·год. У зимовий же період, навпаки, зростають показники імпорту з мережі *(EFrGrid)*: найбільші значення — 141.9–158.8 кВт·год — спостерігаються у грудні та січні. Це логічно відображає баланс між генерацією та навантаженням у сезон низької інсоляції.

Завдяки інтеграції акумуляторної батареї система забезпечує ефективнішу роботу в умовах змінного виробітку. Видно, що частка енергії, яка надходить до споживача саме від сонячних модулів *(E_Solar)*, зберігається на високому рівні протягом більшої частини року: у 8 із 12 місяців вона перевищує 280–320 кВт·год. Це означає, що акумулятор згладжує добові коливання й сприяє збільшенню частки власного споживання, що особливо важливо для гібридних систем.

Підсумовуючи, у літній період система демонструє максимальну генерацію та найнижчу залежність від мережі, тоді як у зимовий — забезпечує базові

потреби споживача, компенсуючи нестачу генерації імпортом з мережі. Перехідні періоди (весна та рання осінь) є найефективнішими з точки зору співвідношення “температура/інсоляція”, що підтверджує важливість вибору оптимального кута нахилу та технології модулів. Загалом отримані дані свідчать про стабільність роботи системи, високу відповідність моделі реальним умовам та ефективне використання наявних ресурсів.

3.4.3 Помісячна референтна інсоляція

Помісячний розподіл інсоляції у площині колектора наведено на рис. 3.7. Графік демонструє характерну для клімату м. Чернівці сезонну динаміку надходження сонячної енергії: від мінімальних значень у зимові місяці до пікових — у літній період. Зокрема, у січні та грудні референтна інсоляція становить лише 1.6–2.0 кВт·год/м²/добу, що пояснює низькі показники генерації у цей час. Починаючи з березня, величина надходження енергії стрімко зростає, досягаючи 5.0–5.7 кВт·год/м²/добу у квітні–травні.

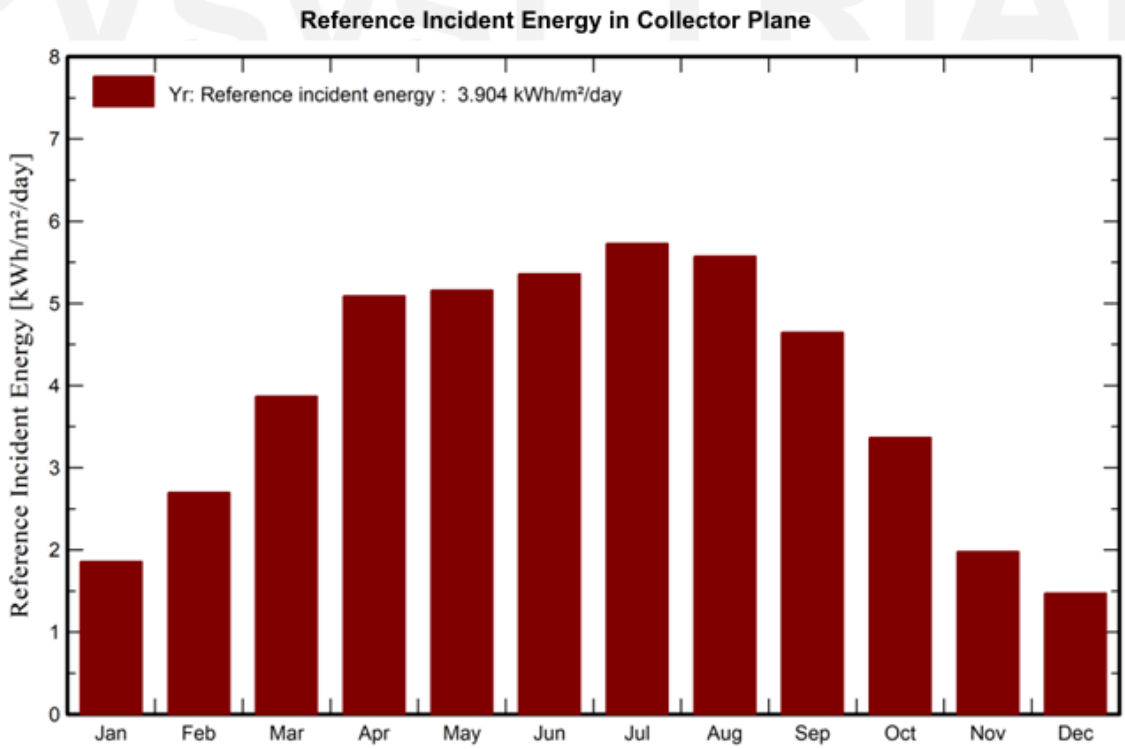


Рисунок 3.7 – Помісячна референтна інсоляція у площині колектора для оптимізованої конфігурації фотоелектричної системи

Максимальні значення інсоляції спостерігаються у червні–липні, коли показник сягає 6.5–7.5 кВт·год/м²/добу. Саме цей період забезпечує найбільшу частку річної генерації, що узгоджується з результатами таблиці річного балансу. У серпні інсоляція трохи зменшується, однак залишається на рівні, достатньому для стабільної роботи системи. Осінні місяці характеризуються поступовим спадом до 2.5–3.5 кВт·год/м²/добу, що природно позначається на зменшенні виробітку.

Загалом середньорічне значення референтної інсоляції становить 3.904 кВт·год/м²/добу, що є типовим для регіонів із помірним континентальним кліматом. Така форма кривої підтверджує правильність вибору кута нахилу модулів (40°), оскільки літньо-весняний максимум інсоляції повністю узгоджується з оптимальним кутом для максимальної річної генерації.

3.4.4 Нормалізовані показники виробітку та структурні втрати

На рис. 3.8 подано нормалізовані показники виробітку та структурні втрати фотоелектричної системи. Цей графік дозволяє оцінити внесок кожного типу втрат у загальний енергетичний баланс, а також порівняти їхню сезонну сталість.

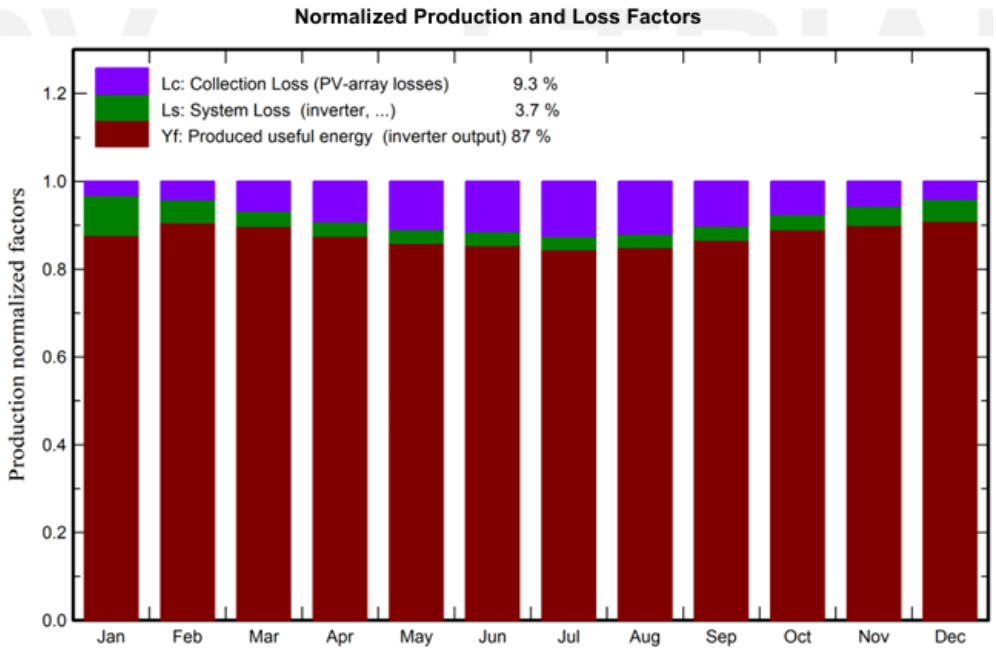


Рисунок 3.8 - Нормалізовані показники виробітку та структурні втрати фотоелектричної системи протягом року

Як видно з діаграми, найбільшу частку займає корисна вироблена енергія (*Yf*), яка протягом року утримується на рівні близько 87 % від потенційно доступної енергії. Це свідчить про те, що коливання умов навколишнього середовища не призводять до суттєвого зростання втрат.

Втрати масиву (*Lc*), що включають температурні втрати, якість модулів, ефекти забруднення та невідповідність елементів, у середньому становлять близько 9.3 %. Їхня сезонна динаміка відносно рівна, однак у літній період помітне незначне збільшення частки цих втрат. Це узгоджується з характером температурних процесів: у червні–серпні підвищення температури модулів призводить до зниження напруги на робочій точці, що природно відображається у трохи вищій частці колекційних втрат. У перехідні сезони (квітень–травень та вересень–жовтень) ці втрати зменшуються, що підтверджує оптимальний баланс між температурою та інсоляцією.

Системні втрати (*Ls*), пов’язані в основному з інверторною частиною системи та процесами перетворення змінного й постійного струму, залишаються практично незмінними протягом року й становлять близько 3.7 %. Така сталість є характерною ознакою якісної роботи інвертора, а також підтверджує, що він працює в оптимальному діапазоні навантажень і не виходить на ділянку дерейтінгу. Важливо, що інвертор не демонструє ознак перевантаження в пікові літні періоди, що було підтверджено на окремому графіку температурного обмеження потужності.

Загальна структура нормалізованих втрат свідчить про те, що фотоелектрична система має високий рівень ефективності, а основні втрати пов’язані не з обмеженнями обладнання, а з об’єктивними кліматичними та фізичними факторами — температурою, забрудненням і геометрією інсоляції. Висока частка корисної енергії (*Yf*) та відносно низький рівень системних втрат підтверджують правильність вибору обладнання, оптимального кута нахилу та загальної конфігурації генератора.

3.4.5 Добова динаміка корисної вихідної енергії

На рис. 3.9 представлено добову динаміку корисної енергії, що подається

системою протягом року. Цей графік відображає реальну мінливість роботи фотоелектричної станції в умовах змінної інсоляції, температури та погодних коливань. Добові коливання генерації є істотними, і це цілком закономірно: навіть у межах одного сезону вплив хмарності, туману або короткочасного падіння сонячної активності здатний спричиняти різницю в десятки кіловат-годин.

У зимові місяці (грудень–січень) добова генерація переважно перебуває в межах 5–25 кВт·год/добу, що відповідає низьким рівням інсоляції та короткому світловому дню. Починаючи з березня, добові значення зростають до 30–50 кВт·год, що свідчить про збільшення сонячної активності й покращення умов для роботи модулів. Найвищі добові піки спостерігаються в період з травня до серпня, коли система регулярно забезпечує 60–75 кВт·год/добу, а окремі значення досягають навіть верхньої межі, близької до 80 кВт·год/добу. Це відображає найсприятливіший баланс між інтенсивністю сонячного випромінювання та помірними температурами повітря.

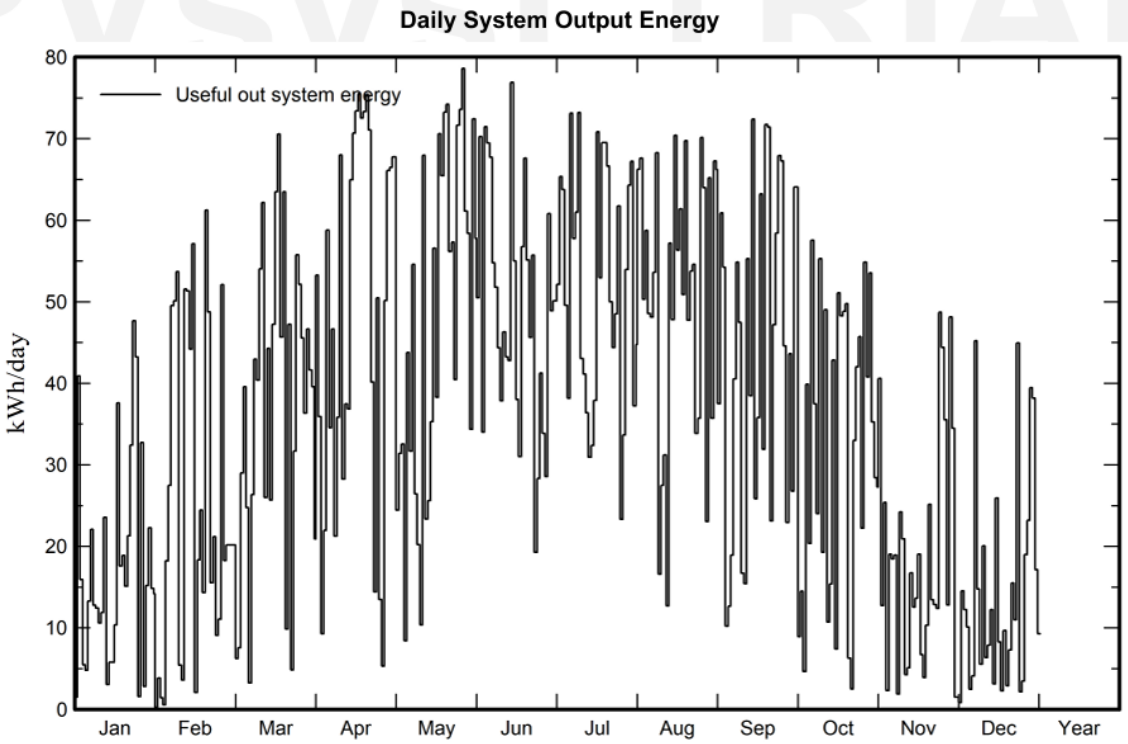


Рисунок 3.9 – Добова динаміка корисної вихідної енергії фотоелектричної системи протягом року

У вересні–жовтні динаміка добових значень поступово знижується, проте система продовжує генерувати стабільно — більшість значень лежить у діапазоні 30–55 кВт·год/добу. Лише в листопаді зниження стає помітним, що узгоджується з різким спадом інсоляції та зменшенням ефективної тривалості дня. Загалом графік демонструє високу стабільність роботи системи: жодних “провалів” або нерегулярностей, які свідчили б про некоректну роботу інвертора, недоступність масиву чи значні втрати, не спостерігається.

Добова крива також підтверджує правильність обраної конфігурації з точки зору співвідношення *DC/AC* та розмірності акумулятора: навіть у пікові місяці видно, що інвертор не виходить на режим обмеження потужності, а коливання добового виробітку повністю зумовлені зовнішніми кліматичними факторами. Таким чином, добовий профіль виробітку є важливим елементом оцінки реальних можливостей станції та підтверджує її стабільність і відповідність очікуваним характеристикам.

3.5 Розрахунок реальної річної ефективності масиву

Це показник того,наскільки ефективно фотоелектричний масив перетворює сонячну енергію, що потрапила на модулі протягом року, у електричну енергію.

Для визначення реальної ефективності використовуються результати *PVsyst*: річна енергія масиву (*EArray*), ефективна річна інсоляція на площині модуля (*I_eff*) та сумарна площа масиву (*A_mod*).

Дано:

Річна енергія масиву: $E_{array} = 14185\ кВт \cdot год$;

Ефективна інсоляція: $I_{eff} = 1372\ кВт \cdot год / м^2$;

Площа масиву: $A_{mod} = 48,6\ м^2$.

Отже, реальна річна ефективність масиву становить:

$$\eta_{real} = \frac{E_{array}}{I_{ff} \cdot A_{mod}}, \tag{3.6}$$

$$\eta_{real} = \frac{14185}{1372 \cdot 48,6} \approx 0,213.$$

Показник реальної річної ефективності масиву на рівні 21.3 % є високим для реальних умов експлуатації приватної фотоелектричної системи та добре узгоджується з технологічними особливостями обраних фотомодулів.

3.6 Перевірка розрахунку температурних втрат за температурним коефіцієнтом

Температурний коефіцієнт модулів *Longi* становить: $\mu_P = -0.28 \frac{\%}{^\circ C}$.

З графіка розподілу температур (рис. 3.10) середня робоча температура модулів близько: $T_{avg} \approx 36\ ^\circ C$.

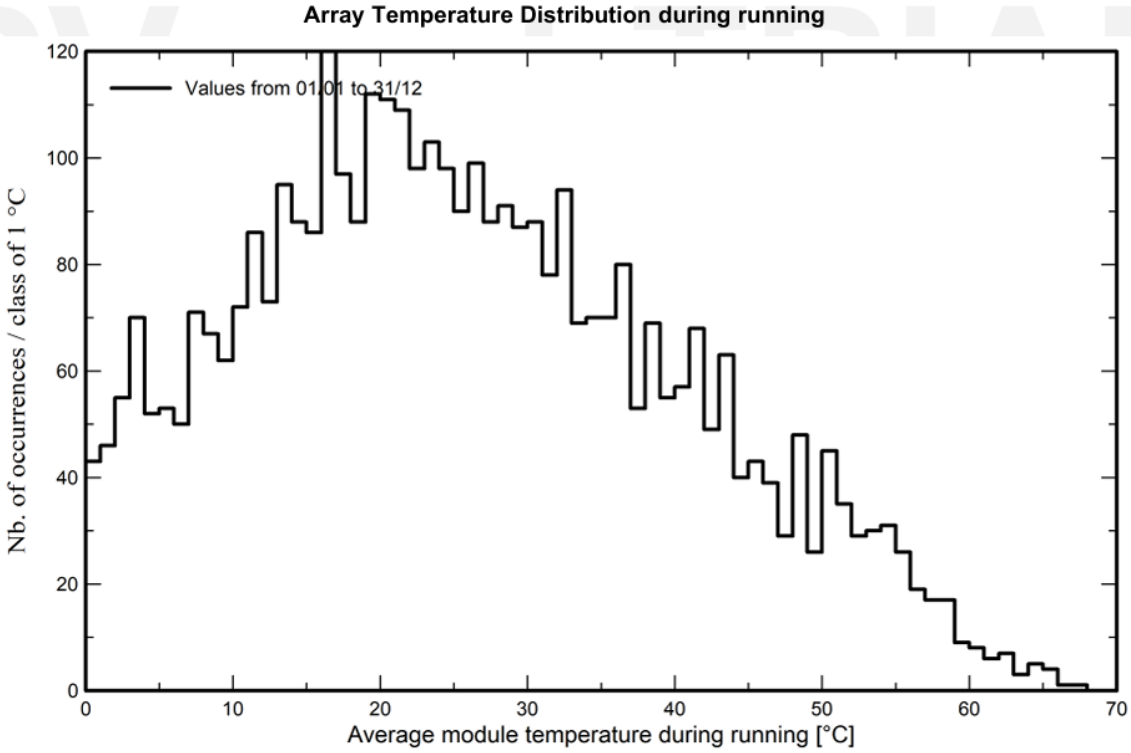


Рисунок 3.10 – Графік розподілу температур

Температурні втрати оцінюють так:

$$\Delta P_{emp} = \mu_P \cdot (T_{vg} - 25^\circ C), \tag{3.7}$$

$$\Delta P_{temp} = -0,28 \cdot (36 - 25) = -3\%.$$

У *PVsyst* температурні втрати подані як –2.9 %, різниця пояснюється округленням *T_avg* з графіка.

Ручний розрахунок підтверджує точність результатів *PVsyst*.

3.7 Аналіз впливу гібридної електростанції на скорочення викидів CO_2

Важливою характеристикою сучасних фотоелектричних систем є їхній внесок у зниження антропогенних викидів CO_2. Для оцінки екологічної ефективності гібридної сонячної електростанції було виконано аналіз балансу викидів, який включає як початкові викиди, пов'язані з виробництвом обладнання, так і подальше заміщення електроенергії з традиційних джерел, що супроводжується суттєвими обсягами CO_2. Деталізовані значення життєвого циклу та викидів CO_2 наведено у Додатку В.

Згідно з результатами моделювання в *PVsyst*, виготовлення фотоелектричних модулів, інвертора, опорної конструкції та допоміжних компонентів супроводжується сумарними викидами близько 17.4 т CO_2. Цей обсяг є початковим «вуглецевим слідом» системи, який повинен бути компенсований у процесі її подальшої експлуатації. Виробництво електроенергії в Україні має значний фактор викидів, що у середньому становить близько 410 г CO_2 на кожен кіловат-годину, тому навіть відносно невелика приватна СЕС здатна забезпечити суттєве скорочення викидів протягом свого життєвого циклу.

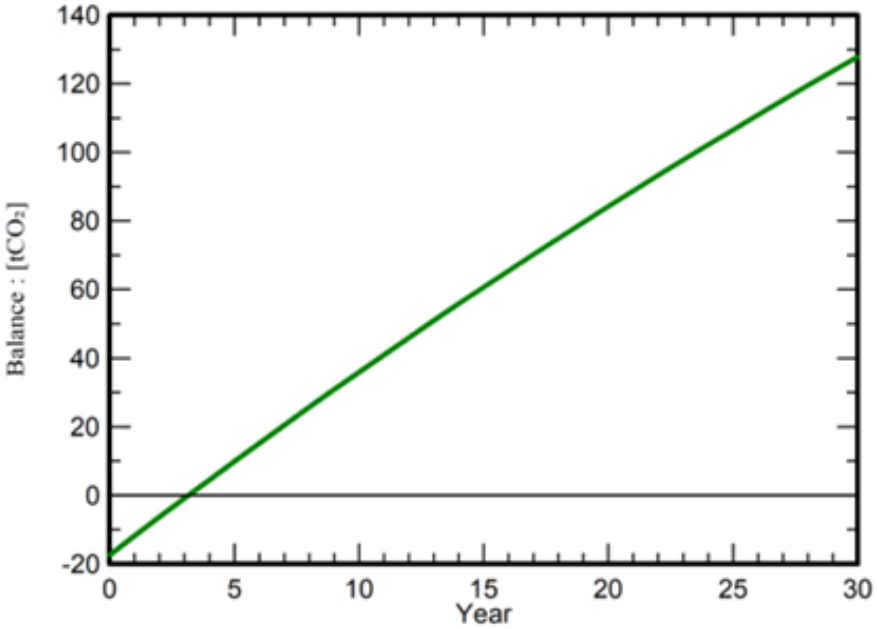


Рисунок 3.11 - Кумулятивний баланс скорочення викидів CO_2 протягом 30 років експлуатації СЕС

Річний виробіток розглянутої станції становить близько 13.6 МВт·год. Це означає, що щороку СЕС заміщує еквівалентну кількість електроенергії, виробленої з переважно вуглецевих джерел, що відповідає приблизно 5.6 т CO_2 на рік. Такий обсяг дозволяє повністю компенсувати первинні викиди, пов'язані зі створенням системи, приблизно за два роки роботи. Після проходження цієї точки система переходить у «позитивний баланс», тобто починає щороку забезпечувати чисте скорочення викидів. Це відображено на рис. 3.11, де видно, як кумулятивне скорочення CO_2 невпинно зростає від нульового значення до понад 120 т CO_2 за 30 років експлуатації.

Таким чином, оціночне значення екологічного прибутку становить близько 150 т CO_2 за 30 років. Це підтверджує, що впровадження приватних СЕС відіграє помітну роль у процесі декарбонізації побутового сектору, особливо в енергетичній системі, де частка викопного палива залишається суттєвою.

Висновки до розділу 3

У межах третього розділу проведено детальне моделювання роботи гібридної фотоелектричної системи та виконано аналіз впливу ключових експлуатаційних і кліматичних факторів на її продуктивність. Моделювання охоплювало декілька груп сценаріїв: зміна кута нахилу модулів, коливання рівня забруднення поверхні (1–3 %), оцінка функціонування системи з акумуляторною батареєю та без неї, а також аналіз сезонних режимів роботи інвертора й температурної поведінки панелей.

Отримані результати засвідчили, що оптимальним для умов м. Чернівці є кут нахилу 40°, який забезпечує найбільший річний виробіток та стабільний коефіцієнт продуктивності *PR* у межах 0.84–0.87. Моделювання впливу забруднення підтвердило, що зростання soiling-factor навіть до 2–3 % помітно

зменшує річну генерацію та підвищує *LCOE*, що підкреслює важливість регулярного очищення поверхні модулів.

Дослідження температурної поведінки показало, що основні втрати енергії пов’язані з підвищенням робочої температури модулів у літній період (≈2.9 %), а також з особливостями інверторної обробки енергії (близько 3 %). Функціонування акумуляторної батареї забезпечило зростання частки самоспоживання до 80–85 %, що підтверджує доцільність її використання у побутових системах із нерівномірним графіком навантаження.

Таким чином, проведене моделювання довело, що обрана конфігурація обладнання — монокристалічні модулі *Longi LR7-72HTH-610M* у поєднанні з гібридним інвертором та батареєю 5.12 кВт·год — є технічно обґрунтованою, енергоефективною та здатною забезпечити високу якість роботи системи протягом року при мінімальному рівні втрат. Отримані дані підтверджують доцільність використання гібридних технологій у приватному секторі.

РОЗДІЛ 4 СТАРТАП-ПРОЄКТ

4.1 Опис ідеї стартап-проєкту

EcoPower Assist — це інноваційний веб-сайт з інтерактивним *3D*-конструктором, який дозволяє користувачам створювати та налаштовувати сонячні електростанції, адаптуючи їх до індивідуальних потреб домогосподарств або бізнесів. Система автоматично прораховує ефективність, вартість обладнання та термін окупності, забезпечуючи простий та інтуїтивно зрозумілий інструмент для користувачів без спеціальних знань в енергетиці.

EcoPower Assist застосовується в сфері енергетики, зокрема в сегменті ВДЕ. Продукт орієнтований на приватних користувачів та малий бізнес, які хочуть отримати доступ до енергетичної незалежності за допомогою сонячної енергії. Основне призначення продукту — надання інструментів для простого, швидкого та точного підбору сонячної електростанції з можливістю прорахунку економічної ефективності та терміну окупності.

У світі, де енергетична незалежність і екологічні рішення стають все більш важливими, багато людей стикаються з труднощами у виборі та впровадженні СЕС для своїх домогосподарств або бізнесів. Відсутність доступних і зрозумілих інструментів для точного розрахунку потреб і підбору оптимального обладнання часто призводить до помилок, які можуть знизити ефективність системи та збільшити витрати.

Крім того, кожен споживач хоче бути впевнений у тому, що його інвестиція в сонячну енергію буде виправданою, а термін окупності – оптимальним. *EcoPower Assist* вирішує ці проблеми, надаючи інноваційний *3D*-конструктор, який дозволяє користувачам точно налаштувати сонячну систему під свої потреби.

4.1.1 Ключові особливості ідеї *EcoPower Assist*

1. *3D*-конструктор СЕС: *EcoPower Assist* надає користувачам можливість створювати індивідуальні *3D*-моделі сонячних систем, де вони можуть вибрати тип панелей, інверторів та інших елементів на основі реальних умов їхнього будинку або бізнесу.

2. Персоналізовані рекомендації: алгоритм автоматично прораховує потреби користувача, враховуючи такі фактори, як площа, тип будівлі, кількість кімнат, рівень споживання енергії, географічне розташування та інші параметри, що дозволяє створити оптимальну конфігурацію сонячної системи.

3. Оцінка ефективності та терміну окупності: продукт надає розрахунки терміну окупності, вартості установки та економії на електроенергії, допомагаючи користувачам приймати обґрунтовані фінансові рішення щодо інвестицій у сонячну енергію.

4. *EcoPower Assist* співпрацює з провідними виробниками обладнання для СЕС, що дозволяє користувачам обрати з актуальних моделей сонячних панелей, інверторів і батарей тощо, представлених у каталозі. Усі ці елементи будуть розміщені у вкладці «Каталог обладнання» або при натисканні на потрібний елемент станції на *3D*-моделі. Також буде встановлено фільтр обладнання, що дозволяє користувачам обрати найбільш економічний та ефективний елемент СЕС.

5. *EcoPower Assist* також взаємодіє з перевіреними монтажними компаніями, що дозволяє користувачам отримувати точні розрахунки вартості не лише обладнання, але й монтажу СЕС. Буде створена вкладка «Монтажні компанії».

6. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс: Завдяки простому інтерфейсу навіть люди без технічних знань можуть легко налаштувати систему, що робить процес доступним для широкого кола користувачів.

7. Гнучкість та масштабованість: Веб-сайт дозволяє моделювати сонячні електростанції як для малих будівель, так і для більших комерційних об'єктів, що робить продукт придатним як для приватних домогосподарств, так і для малого бізнесу.

4.2 Технологічний аудит стартап-проєкту

Проєкт *EcoPower Assist* ґрунтується на застосуванні сучасних цифрових технологій, веб-розробки, *3D*-візуалізації та алгоритмів енергетичного моделювання, що дозволяють створити інтерактивний інструмент для підбору СЕС.

Технологічний аудит визначає рівень доступності, зрілості та можливості інтеграції необхідних технологій у складі працюючого програмного продукту.

У межах аудиту в табл.4.1 оцінено ключові компоненти: веб-платформу, *3D*-конструктор, систему аналітики, бази даних обладнання, інтеграцію з монтажними компаніями та системи онлайн-комунікації з користувачем (чат-бот, рекомендаційний модуль).

Таблиця 4.1 - Технологічна здійсненність проєкту *EcoPower Assist*

Ідея проєкту	Технологія її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
Створення інтерактивного *3D*-конструктора СЕС	Використання бібліотек *Three.js, Babylon.js, WebGL* для побудови інтерактивних *3D*-моделей	Технології є відкритими, перевіреними, широко застосовуються у веб-розробці	Повністю доступні, мають активну підтримку та документацію
Автоматичний розрахунок потужності, ефективності та окупності	Розробка алгоритмів на основі математичних моделей енергоспоживання, кліматичних баз даних та технічних параметрів обладнання	Алгоритми легко реалізуються у *JS/Python*; кліматичні *API* доступні	Доступні *API (Meteonorm, Open-Meteo)*; можна створити локальну базу даних

Продовження табл. 4.1

Інтеграція каталогу обладнання (панелі, інвертори, батареї)	База даних + *API*-інтеграція з виробниками або ручне внесення параметрів	Технології доступні та широко використовуються у *e-commerce*	Можлива інтеграція з більшістю виробників; технічна документація є відкритою
Рекомендації щодо вибору обладнання	Алгоритми персоналізації, фільтри за вартістю/потужністю/ефективністю	Технології є типовими для рекомендованих систем	Повністю доступні, реалізація не потребує ліцензій
Інтеграція системи оплати	*Stripe, Fondy, LiqPay, Google/Apple Pay*	Технології широко використовуються у веб-проєктах	Підключення доступне за умовою реєстрації компанії
Мобільна адаптація веб-сайту	Адаптивна верстка *(HTML5/CSS3)*, фреймворки типу React/Vue	Перевірені та надійні технології	Повністю доступні
Хмарне зберігання та хостинг сайту	*AWS, Azure, DigitalOcean* або українські хостингові платформи	Технології розповсюджені та стабільні	Доступні з різними тарифами

Технологічний аудит показав, що *EcoPower Assist* є технічно здійсненним та інноваційним рішенням, яке поєднує сучасні веб-технології, алгоритмічні інструменти та *3D*-візуалізацію.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

4.3.1 Портрет цільового покупця

Головними цільовими групами, на які спрямований стартап *EcoPower Assist*, є приватні домогосподарства та малий бізнес. Передусім це власники індивідуальних будинків і котеджів, які прагнуть підвищити рівень енергетичної незалежності, зменшити витрати на електроенергію та отримати зручний інструмент для підбору оптимальної конфігурації сонячної електростанції без необхідності звертатися до спеціалістів. Для цієї категорії користувачів особливо важливою є простота інтерфейсу, можливість самостійно моделювати систему та одразу бачити прогноз ефективності й термін окупності.

Другу важливу групу становлять представники малого бізнесу — офіси, магазини, кав'ярні, ресторани, готелі та інші комерційні об'єкти, що мають стабільне енергоспоживання та зацікавлені у зниженні експлуатаційних витрат. Для них *EcoPower Assist* виступає не лише як інструмент попередньої оцінки, а й як спосіб швидко підібрати обладнання відповідно до площі об'єкта, графіку роботи та реальних потреб у потужності. Ця група користувачів цінує точність розрахунків, доступ до актуальних моделей інверторів і панелей та можливість порівняння варіантів за вартістю й економічною вигодою. Розширена характеристика покупців навдена в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Характеристики потенційних клієнтів стартап-проєкту

Параметр	Опис
Що хочуть купити	*3D*-модель сонячної електростанції, індивідуальне рішення з прорахунками терміну окупності, техніко-економічних показників з вибором обладнання та монтажних бригад
Хто покупець	Власники приватних будинків, малі та середні бізнеси, фермери

Продовдення табл. 4.2

Мета купівлі	Зниження витрат на електроенергію, забезпечення автономності
Коли покупець купує продукт	При високих цінах на електроенергію, при будівництві/реконструкції будинку, при зростанні тарифів, при відключеннях світла
Де покупець бажає придбати продукт	Через онлайн-платформу з *3D*-моделлю та з можливим обладнання і монтажем до неї
Мета стартапера	Допомогти користувачам знайти вигідне енергоефективне та економічно доцільне рішення

4.3.2 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

У таблиці 4.3 наведено порівняння ключових параметрів двох основних конкурентних рішень *Solar Pro* та *SAM*.

Таблиця 4.3 - Ступеневий порівняльний аналіз конкурентів стартапу *EcoPower Assist*

Критерій оцінювання	Конкурент 1 - *Solar Pro*	Конкурент 2 - *SAM*	Стартап - *EcoPower Assist*
Ключові/унікальні властивості продукту	Програмне забезпечення для моделювання СЕС; висока точність через щохвилинний розрахунок, *3D*-інтерфейс для візуалізації	Моделювання енергетичних проєктів для мережевих та гібридних СЕС; інтеграція з базами даних для створення звітів	*3D*-конструктор для створення СЕС з оцінкою ефективності тощо; має каталог відомого обладнання та монтажних компаній

Продовження табл. 4.3

Наявність захисту об’єкту інтелектуальної власності	Використовується ліцензія на програмне забезпечення	Використовується ліцензія на програмне забезпечення	Реєстрація права інтелектуальної власності на ПЗ та реєстрація назви як торгової марки
Наявність бренду	Бренд середнього рівня популярності в Китаї, Індії, Кореї та США	Бренд середнього рівня популярності в США	Новий стартап в Україні, брендинг в процесі розвитку
Доступ до обмежених ресурсів	Велика база даних метеостанцій та модулів	Доступ до Національної бази даних сонячного випромінювання США	Співпраця з виробниками обладнання та монтажними компаніями; геолокаційний доступ (з урахуванням інсоляційної карти)
Точки співпраці з аудиторією	Навчання, консультації, підтримка клієнтів	Технічна підтримка та навчальні ресурси	Загальні рекомендації, консультації та технічна підтримка через чат-бот
Канали продажу	Програмне забезпечення доступне через веб-сайти	Ліцензування через організації або онлайн	Онлайн-платформа через веб-сайт

Продовження табл. 4.3

Мережа взаємодії з клієнтом	Підтримка через сайт, навчання	Підтримка користувачів через онлайн платформи	Підтримка через онлайн консультації
Обсяг ринку	Середній обсяг, особливо в Китаї та Кореї	Охоплює ринок США та міжнародний	Орієнтований на приватних користувачів та малий бізнес в Україні
Ціна продукту (орієнтовна)	Має 30-денну безкоштовну версію; навчальна версія коштує 1300 $, а комерційна версія –2050 $	Безкоштовне базове використання, має платні функції	Має безкоштовну *Demo* версію та преміум (повну версію) - за фіксованою ставкою 24 $

За результатами проведеного порівняльного аналізу:

1. Унікальність продукту. На відміну від конкурентів, *EcoPower Assist* пропонує не просто інструмент для моделювання, а повноцінний *3D*-конструктор сонячних електростанцій з інтегрованими розрахунками ефективності, терміну окупності та каталогом обладнання і монтажних компаній. Це значно спрощує процес вибору оптимальної конфігурації для кінцевого користувача.

2. Розширений захист інтелектуальної власності. Якщо конкуренти використовують стандартні ліцензії, *EcoPower Assist* додатково має зареєстровану торгову марку та право інтелектуальної власності на окремі компоненти програмного забезпечення. Це підвищує безпеку продукту та його інвестиційну цінність.

3. Доступність і справедлива цінова модель. Вартість повної версії *EcoPower Assist* становить лише 24 $, що робить платформу у 50–80 разів доступнішою за

Solar Pro (1300–2050 $) і значно гнучкішою за *SAM*, який вимагає оплату за розширені функції. Це відкриває продукт широкому колу українців.

4. Локалізація під український ринок. На відміну від міжнародних конкурентів, *EcoPower Assist* адаптований під українські кліматичні умови, тарифи, інсоляцію та локальні монтажні компанії. Це забезпечує високу точність розрахунків і кращу відповідність реальним умовам експлуатації.

5. Простота використання та клієнтська підтримка. Завдяки інтегрованому чат-боту та рекомендаціям користувач може отримати відповіді на запитання без технічних знань. Це робить сервіс значно дружнішим до пересічного користувача, ніж *Solar Pro* чи *SAM*.

6. Гнучка онлайн-модель роботи. *EcoPower Assist* надає демонстраційну версію, працює повністю онлайн і не потребує встановлення важкого ПЗ, на відміну від професійних конкурентів.

4.3.3 Фактори загроз та можливостей

У таблицях 4.4 та 4.5 наведено характеристики потенційних загроз та можливостей.

Таблиця 4.4 – Потенційні технологічні та ринкові можливості стартапу *EcoPower Assist*

Категорія можливостей	Характеристика	Прояв у стартапі *EcoPower Assist*
Розвиток цифровізації	Активне впровадження онлайн-сервісів та автоматизованих платформ у сферу ВДЕ	Інтерактивний 3D-конструктор, автоматичні розрахунки, онлайн-доступність
Зростання попиту на СЕС	Попит з боку приватних домогосподарств і малого бізнесу через високі тарифи	Цільова аудиторія проєкту повністю відповідає ринковому тренду

Продовження табл. 4.4

Зростання інтересу до енергонезалежності	Поширення гібридних систем із накопиченням енергії	Стартап має модуль для підбору АКБ та оцінки автономності
Партнерство з монтажними компаніями	Розширення ринку послуг з інсталяції СЕС	Інтеграція каталогу монтажників з можливістю замовлення
Інтеграція з виробниками обладнання	Виробники панелей та інверторів зацікавлені в рекламі та лістингу	Можливість створення партнерських каталогів та системи рекомендацій
Розвиток *AI*-технологій у сфері ВДЕ	Широке впровадження алгоритмів оптимізації	Створення рекомендаційних алгоритмів для оптимального підбору СЕС
Грантові та інвестиційні програми	ЄС, *USAID, Horizon Europe* підтримують «зелений» сектор	Потенціал залучення фінансування для масштабування

Таблиця 4.5 – Потенційні ризики та загрози для стартапу *EcoPower Assist*

Категорія загроз	Суть загрози	Ризики для *EcoPower Assist*
Конкуренція на ринку програмного забезпечення	Поява нових платформ або активізація існуючих (*SolarPro, SAM* тощо)	Зменшення частки ринку, потреба в постійному оновленні функціоналу
Економічна нестабільність в Україні	Коливання курсу, зниження платоспроможності населення	Зменшення попиту на встановлення СЕС у певні періоди

Продовження табл. 4.5

Зміни у законодавстві щодо СЕС	Модифікації умов підключення, тарифів, «зеленого» ринку	Необхідність постійно оновлювати нормативну базу на платформі
Технологічні кіберзагрози	Ризики зламу, підміни даних, крадіжки інтелектуальної власності	Необхідність у підвищеному рівні захисту даних
алежність від сторонніх партнерів	Виробники обладнання або монтажники можуть змінити умови співпраці	Втрата частини каталогу або погіршення якості послуг
Недовіра частини аудиторії до онлайн-інструментів	Люди звикли до «традиційних» консультацій	Потрібні демонстраційні матеріали, підтримка та навчальні відео

4.3.4 *SWOT*-аналіз

Виявлено такі сильні сторони:

1. Інноваційна технологія 3D-конструктора, що дозволяє користувачам налаштовувати СЕС для індивідуальних потреб.

2. Простота у використанні, доступність для людей без технічних знань.

3. Можливість інтеграції з іншими екологічними рішеннями (наприклад, електричні автомобілі, енергоефективні будинки).

4. Фокус на екологічність — акцент на відновлювані джерела енергії, що відповідає сучасним трендам та 4-му енергетичному пакету ЄС.

Виявлено такі слабкі сторони:

1. Відсутність відомого бренду та довіри серед широкої аудиторії.

2. Складнощі в залученні цільової аудиторії, яка може бути недостатньо обізнана з перевагами сонячних електростанцій.

3. Необхідність в кваліфікованих і досвідчених працівниках.

Виявлено такі можливості:

1. Ріст попиту на автономні та гібридні СЕС у зв'язку з енергокризами та нестабільною енергосистемою.

2. Збільшення попиту на економію коштів через зростання тарифів на електроенергію.

3. Державні програми підтримки зеленої енергетики та енергоефективності.

Виявлено такі загрози:

1. Конкуренція з боку інших компаній, що пропонують подібні рішення або вже мають доступ до ринку.

2. Невизначеність в законодавстві щодо ВДЕ та можливі зміни в політиці державної підтримки.

3. Технічні складнощі, які можуть виникнути під час інтеграції нових технологій на ринку.

4. Зміна економічних умов, що може вплинути на попит на інвестиції в сонячні системи.

4.4 Розроблення маркетингової програми проєкту

У табл. 4.6 наведено аналіз цільових груп потеційних споживачів.

Таблиця 4.6 - Аналіз цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживача прийняти продукт	Орієнтовний попит у межах сегмента	Інтенсивність конкуренції	Простота входу у сегмент
Власники приватних будинків (домогосподарства)	Висока	Високий	Низька	Висока
Малий та середній бізнес (офіси, магазини, кафе)	Середня	Високий	Середня	Середня

Продовження табл. 4.6

Готелі, ресторани, комерційна нерухомість	Висока	Середній	Низька	Середня
Фермерські господарства та агробізнес	Середня	Середній	Низька	Низька
Монтажні компанії та інсталятори СЕС (B2B)	Низька	Низький	Висока	Середня

Таблиця 4.7 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Питання	Відповідь
Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Так, оскільки в Україні відсутні аналогічні онлайн-платформи з 3D-конструктором СЕС та економічним аналізом
Чи буде компанія шукати нових споживачів, чи забирати існуючих у конкурентів?	Шукатиме нових споживачів серед приватних домогосподарств та малого бізнесу
Чи буде компанія копіювати характеристики послуг конкурентів?	Ні, оскільки продукт є унікальним за функціоналом та має відмінний формат взаємодії з користувачем
Стратегія конкурентної поведінки	Стратегія інноваційного прориву: запуск унікального рішення, якого немає на українському ринку

У таблиці 4.7 наведено результати вибору цільових груп потенційних споживачів продукту *EcoPower Assist*. Аналіз показав, що найбільш перспективним є сегмент приватних домогосподарств, який характеризується

високою готовністю до впровадження продукту, значним попитом та низькою інтенсивністю конкуренції. Другим за значущістю сегментом є малий і середній бізнес, де попит також є високим, проте конкуренція — помірна. Сегменти готельно-ресторанного бізнесу та агросектору можуть бути охоплені на наступних етапах розвитку. Таким чином, основною цільовою групою для стартового просування проєкту обрано власників приватних будинків.

У табл. 4.8 подано результати визначення базової стратегії конкурентної поведінки стартапу *EcoPower Assist*. Оцінювання показало, що проєкт є фактичним «першопрохідцем» на українському ринку інструментів для *3D*-моделювання СЕС та розрахунку економічної ефективності. Оскільки продукт має унікальний функціонал і не копіює існуючі рішення, обрана стратегія інноваційного прориву є оптимальною. Вона передбачає формування нового ринкового сегмента, пошук нової аудиторії та створення диференційованої цінності для споживача.

Таблиця 4.8 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги цільової групи	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентні переваги проєкту	Асоціації, які мають сформувати позицію
Доступність, простота використання, точність розрахунків, можливість бачити 3D-модель системи	Інноваційний прорив та активне просування	Інтерактивний 3D-конструктор, індивідуальні рекомендації, каталог обладнання, вибір монтажників, локалізована система розрахунків	Надійність, сучасність, економічність, енергонезалежність

У таблиці 4.9 подано ключові елементи концепції маркетингової комунікації *EcoPower Assist*, що враховує особливості кожної цільової групи. Для приватних домогосподарств основний акцент робиться на простоті використання та фінансовій вигоді, тоді як для малого бізнесу — на економії витрат і надійності розрахунків. Монтажні компанії розглядаються як стратегічні партнери, для яких важливою є можливість отримувати нових клієнтів через платформу. Окремо виділено комунікацію з інвесторами та державними установами, для яких ключовими є інноваційність, масштабованість і суспільна користь проєкту.

Таблиця 4.9 – Концепція маркетингової комунікації стартапу *EcoPower Assist*

Цільові групи	Канали комунікацій клієнтів	Ключові позиції для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Приватні домогосподарства	Інтернет, соціальні мережі, *YouTube, Google Ads*	Доступність, простота використання, економічна вигода	Зацікавити встановленням СЕС та показати економію	«Обери свою сонячну станцію за 5 хвилин. Бачиш одразу окупність, економію та *3D*-модель»
Малий та середній бізнес	Інтернет, *LinkedIn*, сайт проєкту, галузеві форуми	Надійність, професійний розрахунок, ефективність	Показати можливість зменшити операційні витрати	«Скороти витрати на електроенергію та плануй розвиток бізнесу»

Продовження табл. 4.9

Монтажні компанії та інсталятори СЕС	Професійні спільноти, Інтернет, *Telegram*-канали ВДЕ	Партнерство, доступ до клієнтів, автоматизація	Привернути монтажників як партнерів	«Приєднуйся до каталогу *EcoPower Assist* та отримуй клієнтів автоматично»
Інвестори, грантові фонди, донори	Інтернет, офіційний сайт, пітч-дек, *Email*-розсилки	Інноваційність, масштабованість, соціальна користь	Сформувати інтерес до інвестицій	«*EcoPower Assist* — перша українська платформа з *3D*-конструктором СЕС для приватного сектору»
Освітні та державні установи	Інтернет, офіційні платформи, презентації	Освітня та суспільна цінність, прозорість	Продемонструвати користь для громади та енергобезпеки	«Платформа підтримує розвиток ВДЕ та енергонезалежність України»

Висновки до розділу 4

У розділі було детально опрацьовано концепцію стартап-проєкту *EcoPower Assist*, спрямованого на створення інтерактивної веб-платформи з *3D*-конструктором СЕС. Основна ідея проєкту полягає у наданні користувачам доступного інструменту для моделювання СЕС, вибору обладнання та

розрахунку ефективності й терміну окупності, що дозволяє підвищити рівень енергетичної незалежності домогосподарств та малого бізнесу.

Було проведено технологічний аудит, який підтвердив технічну здійсненність проєкту та доступність усіх необхідних технологій — від алгоритмів енергетичного моделювання до систем *3D*-візуалізації та кліматичних *API*.

У межах аналізу ринкових можливостей визначено основні цільові групи користувачів, серед яких найбільш перспективними є приватні домогосподарства та малий бізнес. Для кожного сегмента оцінено рівень попиту, готовність прийняти продукт, конкуренцію та простоту входу на ринок. Проведений ступеневий аналіз показав, що *EcoPower Assist* має суттєві конкурентні переваги — зокрема, унікальний *3D*-конструктор, локалізацію під українські умови, доступну ціну та розширений захист інтелектуальної власності.

На основі отриманих даних була сформована маркетингова стратегія проєкту, визначено стратегію конкурентної поведінки та позиціонування, а також розроблено концепцію комунікацій із різними цільовими групами. Основними перевагами *EcoPower Assist* є інноваційність, доступність, простота використання та відповідність сучасним тенденціям розвитку відновлюваної енергетики в Україні.

Розроблена стратегія інноваційного прориву забезпечує потенціал для успішного виходу продукту на ринок і його подальшого зростання в умовах зростаючого попиту на енергонезалежні та економічно ефективні рішення.

ВИСНОВКИ

1. У першому розділі було визначено ключові бар’єри та можливості для розвитку децентралізованої енергетики. Порівняння українського регуляторного поля з нормами ЄС засвідчило необхідність подальшої гармонізації стандартів та процедур, що створить більш сприятливі умови для розвитку приватних СЕС. *SWOT*-аналіз і оцінка інтересів зацікавлених сторін показали, що ефективність малих систем визначається одночасно технічними характеристиками обладнання, економічними умовами, доступністю сервісів та рівнем залучення споживачів.

2. Другий розділ був присвячений характеристикам об’єкта моделювання та формуванню технічної бази для розрахунків. Установлено, що досліджуване домогосподарство має придатні архітектурні параметри для встановлення дахової СЕС, а кліматичні умови м. Чернівці забезпечують достатній сонячний потенціал. Обґрунтований вибір *PVsyst* дозволив створити точну цифрову модель системи, у якій були інтегровані реальні технічні параметри модулів, інвертора та акумуляторної батареї. Побудована структурна схема гібридної установки дала можливість визначити функціональні режими роботи системи та особливості взаємодії її компонентів.

3. У третьому розділі проведено числове моделювання та оцінку впливу конструктивних і експлуатаційних параметрів на ефективність установки. Порівняння сценаріїв дозволило встановити оптимальний кут нахилу модулів для місцевих кліматичних умов, оцінити негативний вплив забруднення поверхні та температурних втрат, а також визначити роль акумуляторної батареї у підвищенні частки самоспоживання. Результати показали, що конфігурація з модулем *Longi LR7-72HTH-610M*, гібридним інвертором і АКБ 5.12 кВт·год забезпечує стабільну роботу, високу річну генерацію та низький рівень втрат, що робить її технічно та економічно доцільною для приватного сектору.

4. Четвертий розділ розширив технічні результати системним поглядом на можливості інноваційної комерціалізації рішень у сфері малої генерації. Запропонований стартап-проєкт *EcoPower Assist* демонструє, що на основі отриманих методичних і технічних напрацювань можна створити конкурентоспроможний продукт — веб-платформу з інтерактивним 3D-конструктором СЕС. Проведений технологічний, ринковий та стратегічний аналіз підтвердив потенціал такого рішення для українського ринку та його здатність сприяти зростанню енергетичної незалежності домогосподарств.

5. У підсумку, робота сформувала науково обґрунтовану методику оцінювання продуктивності гібридних СЕС, продемонструвала можливості оптимізації їх параметрів за допомогою математичного моделювання та показала практичну цінність інноваційних цифрових інструментів для розвитку відновлюваної енергетики. Отримані результати мають як прикладне значення для конкретного домогосподарства, так і ширшу цінність для формування підходів до проєктування, оцінки та впровадження гібридних СЕС у сучасних умовах української енергетичної системи.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1) Рейтинг областей за кількістю СЕС у приватних домогосподарствах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: h https://ecopolitic.com.ua/ua/news/stalo-vidomo-skilki-domashnih-ses-uzhe-vstanovleno-v-ukraini

2) Сонячна енергетика в Україні 2025: відновлення після пошкоджень та нова реальність [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://sonergia.com.ua/sonyachna-energetyka-v-ukrayini-2025

3) Енергетична стійкість України — виклики, політика, технології [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://e-b.com.ua/energeticna-stiikist-ukrayini-vikliki-politika-texnologiyi-8074

4) Закон України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text

5) Закон України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text

6) Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» від 17.02.2011 № 3038-VI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://e-b.com.ua/energeticna-stiikist-ukrayini-vikliki-politika-texnologiyi-8074

7) Закон України «Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг» від 22.09.2016 № 1540-VIII [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text

8) Кодекс систем передачі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text

9) Кодекс систем розподілу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text

10) Постанова НКРЕКП № 2651 від 29.12.2023 «Про затвердження Порядку продажу та обліку електричної енергії, виробленої активними споживачами, та розрахунків за неї» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v2651874-23#Text

11) Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. № 761-р «Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ips.ligazakon.net/document/kr240761?an=4

12) Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 липня 2024 р. № 713-р «Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://e-b.com.ua/energeticna-stiikist-ukrayini-vikliki-politika-texnologiyi-8074

13) Розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 р. № 587-р «Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ips.ligazakon.net/document/kr240713?an=4

14) Розпорядження Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2022 р. № 908-р «Про схвалення Концепції впровадження "розумних мереж" в Україні до 2035 року» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ips.ligazakon.net/document/kr240587?an=2

15) Постанова НКРЕКП від 25.03.2025 № 465 «Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію, вироблену генеруючими установками приватних домогосподарств» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0465874-25#n24

16) Постанова НКРЕКП від 30.08.2019 № 1817 «Про затвердження Порядку встановлення, перегляду та припинення дії «зеленого» тарифу на електричну енергію для суб’єктів господарської діяльності, споживачів електричної енергії, у тому числі енергетичних кооперативів, та приватних домогосподарств, генеруючі установки яких виробляють електричну енергію з альтернативних джерел

енергії» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0465874-25#n24

17) СОУ НЕК 341.001:2019 «Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82648

18) ДСТУ 8328:2015 «Геліоенергетика. Модулі фотоелектричні. Загальні технічні вимоги» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=62883

19) ДСТУ EN 60904-1:2009 «Фотоелектричні прилади. Частина 1: Фотоелектричні вольтамперні характеристики. Методи вимірювання» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=26101

20) ДСТУ EN 60904-2:2018 «Прилади фотоелектричні. Частина 2. Вимоги до базових фотоелектричних приладів» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81657

21) ДСТУ ISO 9488:2010 «Енергія сонячна. Словник термінів» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68857

22) ДСТУ EN 62109-1:2014 (EN 62109-1:2010, IDT; IEC 62109-1:2010, IDT) «Безпечність силових перетворювачів, застосовуваних у фотоелектричних системах. Частина 1. Загальні вимоги» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91604

23) ДСТУ EN 62109-2:2014 (EN 62109-2:2011, IDT; IEC 62109-2:2011, IDT) «Безпечність силових перетворювачів, застосовуваних у фотоелектричних системах. Частина 2. Спеціальні вимоги до інверторів» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91605

24) ДСТУ EN IEC 61730-1:2018 (EN IEC 61730-1:2018; AC:2018-06, IDT; IEC 61730 1:2016, IDT) «Визначення безпеки фотоелектричних модулів. Частина

1. Вимоги до конструкції» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80267

25) ДСТУ EN IEC 61730-2:2018 (EN IEC 61730-2:2018; AC:2018-06, IDT; IEC 61730 2:2016, IDT) «Визначення безпеки фотоелектричних модулів. Частина 2. Вимоги до випробувань» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96936

26) Orzhel O. FOURT ENERGY PACKAGE [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://kompek.rada.gov.ua/uploads/documents/31123.pdf

27) Директива (ЄС) 2018/844 Європейського парламенту та Ради від 30 травня 2018 р. «Про енергетичну ефективність будівель». – *Official Journal of the European Union*, L 156, 19.06.2018 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844

28) Директива (ЄС) 2018/2001 Європейського парламенту та Ради від 11 грудня 2018 р. «Про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел». – *Official Journal of the European Union*, L 328, 21.12.2018 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001

29) Директива (ЄС) 2018/2002 Європейського парламенту та Ради від 11 грудня 2018 р. «Про енергоефективність». – *Official Journal of the European Union*, L 328, 21.12.2018 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2002

30) Регламент (ЄС) 2018/1999 Європейського парламенту та Ради від 11 грудня 2018 р. «Про управління Енергетичним Союзом та боротьбу зі зміною клімату». – *Official Journal of the European Union*, L 328, 21.12.2018 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_030-18#Text

31) Регламент (ЄС) 2019/941 Європейського парламенту та Ради від 5 червня 2019 р. «Про готовність до ризиків у секторі електроенергетики». – *Official Journal of the European Union*, L 158, 14.06.2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0941

32) Регламент (ЄС) 2019/942 Європейського парламенту та Ради від 5 червня 2019 р. «Про заснування Агентства Європейського Союзу із співробітництва органів енергетичного регулювання (ACER)». – *Official Journal of the European Union*, L 158, 14.06.2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0942

33) Регламент (ЄС) 2019/943 Європейського парламенту та Ради від 5 червня 2019 р. «Про внутрішній ринок електроенергії». – *Official Journal of the European Union*, L 158, 14.06.2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/943/2024-07-16/eng

34) Директива (ЄС) 2019/944 Європейського парламенту та Ради від 5 червня 2019 р. «Про загальні правила для внутрішнього ринку електроенергії». – *Official Journal of the European Union*, L 158, 14.06.2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0944

35) *Mandal S., Dutta P. Photovoltaic Systems: Advances in Research and Applications / Sudip Mandal, Pijush Dutta, Editors. — New York: Nova Science Publishers, Inc., 2023.*

36) Чому в Україні слід розвивати децентралізовану енергетику вже сьогодні? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2018/06/Brief-rozpodilena-generacia-s.pdf

37) Зінченко А. Стимулювання розподіленої генерації в 4-му Енергетичному Пакеті ЄС / Андрій Зінченко. — Київ: Представництво Фонду ім. Гайнріха Бьолля в Україні, 2020. — 57 с [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ua.boell.org/sites/default/files/2020-10/Стимулювання%20розподіленої%20генерації%20в%204му%20Енергетичному%20Пакеті%20ЄС.pdf

38) Щодо імплементації 4-го енергетичного пакету «Чиста енергія для європейців» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://saee.gov.ua/news/derzenergoefektivnosti-spivpraciuje-iz-energeticnim-

spivtovaristvom-shhodo-implementaciyi-4-go-energeticnogo-paketu-cista-energiia-dlia-jevropeiciv

39) Що дасть Україні впровадження 4-го Енергетичного Пакету ЄС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ecoaction.org.ua/shcho-dast-ua-4enerhopaket.html?iebrowser=1

40) *PVsyst* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.pvsyst.com/en

41) *Solar resource maps & GIS data* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=ukraine

42) Двонаправлені електролічильники для «зеленого» тарифу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://generacia.energy/zelenyj-tarif/dvonapravleni-elektrolichilniki-dlja-zelenogo-tarifu-jaki-buvajut-ta-jak-pracjujut

43) Монокристалічна сонячна панель Longi Solar LR7-72HTH-610M [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/longi-solar-lr7-72hth-610m-hpbc-hi-mo-6max/?tab=about

44) Гібридний інвертор *Deye SUN-10K-SG04LP3-EU* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-inverters/deye-sun-10k-sg04-lp3-eu?srsltid=AfmBOorpddLz4OAt9lN0e8m1jLRSg0SVkFkthKkKLnUHcsBONevidiPo

45) Акумулятор *BSLBATT 51.2V* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.bsl-battery.com/uk/48v-100ah-lifepo4-server-rack-battery.html

46) *B-LFP48-100E 3U 51.2V 5.12kWh* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.bsl-battery.com/uploads/B-LFP-48-100E-3U-Datasheet-en2.pdf

47) *Why Building-Integrated Photovoltaics?* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://solarstone.com/blog/why-building-integrated-photovoltaics

48) Оптимізатор потужності сонячних панелей [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://solarsystem.com.ua/optimizator-potuzhnosti/?srsltid=AfmBOorEasBFqP7Um_cRhsRwJTaqy6e5mqRlT54P47njcy44dD80IoQM

49) Що таке *bypass*-діод і навіщо він потрібен у сонячній панелі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eco-energy-cs2270223.prom.ua/ua/a378906-chto-takoe-bypass.html

50) ПЗІП для сонячних панелей [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://eco-volt.com.ua/blog/uzip-dlya-solnechnykh-paneley-kak-zashchitit-svoyu-ses-ot-molniy-i-perenapryazheniy

51) Двосторонні сонячні панелі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Двосторонні_сонячні_панелі

52) Фінансові стимули та гранти для бізнесу на встановлення сонячних панелей в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://generacia.energy/zelenyj-tarif/finansovi-stimuli-ta-granti-dlja-biznesu-na-vstanovlennja-sonjachnih-panelej-v-ukraini

53) *Aïssa B., Tabet N. (ред.). Photovoltaic Technology for Hot and Arid Environments. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2023.*

54) *Messenger R. A., Ventre J. Photovoltaic Systems Engineering. – Boca Raton: CRC Press, 2019.*

55) *Wenham S. R., Green M. A., Watt M. E., Corkish R. Photovoltaic System Design and Practice. – Wiley, 2011.*

56) *Mani M., Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14(9). – P. 3124–3131.*

57) *Ilse K., Micheli L., Figgis B., Wolfertstetter F., et al. Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2018. – Vol. 26. – P. 1014–1032.*

ДОДАТКИ

Додаток А

Grid storage - Self-consumption

Battery

Manufacturer	Generic
Model	B-LFP48 48-100E

Battery pack

Nb. of units	1 unit
Voltage	51 V
Nominal Capacity (C10)	100 Ah
Nominal energy	5.12 kWh
Operating SOC limits	95.0 / 20.0 %
Useable energy	3.84 kWh
Operating temperature	Fixed 20 °C

Battery input charger

Model	Generic
Max. charging power	3.25 kWdc
Max./Euro effic.	97.0 / 95.0 %

Battery to Grid inverter

Model	Generic
Max. discharging power	3.20 kWac
Max./Euro effic.	97.0 / 95.0 %

Array losses

Array Soiling Losses

Loss Fraction 1.0 %

Thermal Loss factor

Module temperature according to irradiance

Uc (const) 20.0 W/m²K

Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s

LID - Light Induced Degradation

Loss Fraction 0.5 %

Module Quality Loss

Loss Fraction -0.75 %

Module mismatch losses

Loss Fraction 2.00 % at MPP

IAM loss factor

Incidence effect (IAM): Fresnel smooth glass, n = 1.526

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.998	0.981	0.948	0.862	0.776	0.636	0.402	0.000

DC wiring losses

Global wiring resistance 10 mΩ

Loss Fraction 0.3 % at STC

Array #1 - PV Array

Global array res.	69 mΩ
Loss Fraction	0.2 % at STC

Array #2 - Sub-array #2

Global array res.	325 mΩ
Loss Fraction	1.5 % at STC

System losses

Unavailability of the system

Time fraction 0.5 %

2.0 days,

2 periods

Auxiliary losses

constant (fans) 10 W

0.0 kW from Power thresh.

Night aux. cons. 10 W

AC wiring losses

Inv. output line up to injection point

Inverter voltage 400 Vac tri

Loss Fraction 0.22 % at STC

Inverter: SUN-10K-SG04LP3-EU

Wire section (1 Inv.)	Copper 1 x 3 x 6 mm²
Wires length	19 m

Inverter: SUN-10K-SG04LP3-EU

Wire section (1 Inv.)	Copper 1 x 3 x 3 mm²
Wires length	0 m

Рисунок А.1 - Деталізовані значення втрат СЕС за категоріями

Додаток Б

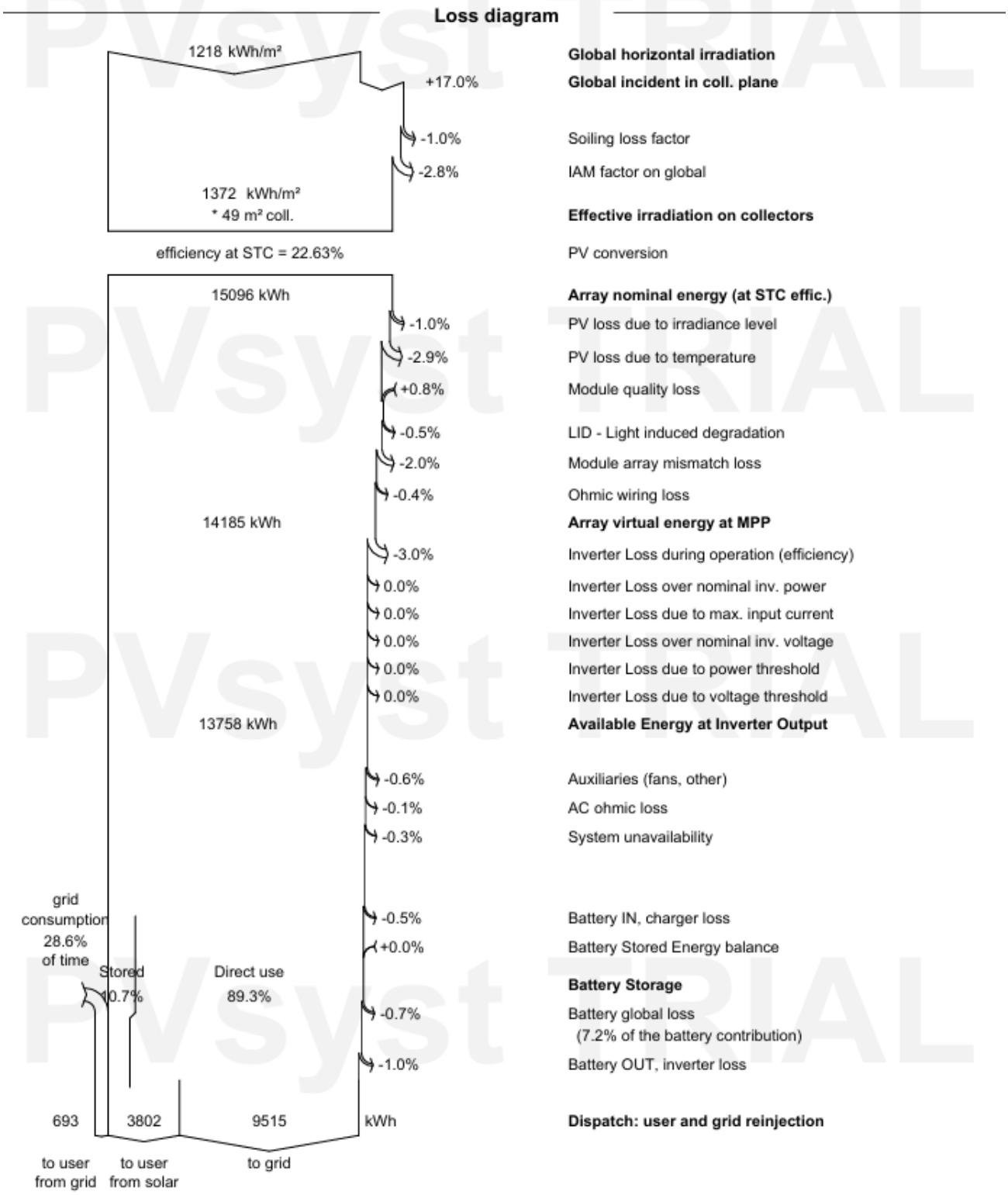


Рисунок Б.1 - Узагальнена діаграма енергетичних втрат СЕС

Додаток В

CO_2 Emission Balance

Total: 127.9 tCO_2

Generated emissions

Total: 17.42 tCO_2

Source: Detailed calculation from table below

Replaced Emissions

Total: 167.4 tCO_2

System production: 13.61 MWh/yr

Grid Lifecycle Emissions: 410 gCO_2/kWh

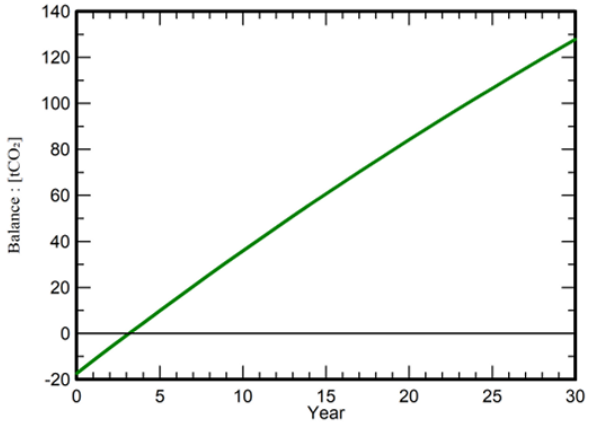
Source: IEA List

Country: Ukraine

Lifetime: 30 years

Annual degradation: 1.0 %

Saved CO_2 Emission vs. Time



System Lifecycle Emissions Details

Item	LCE	Quantity	Subtotal
			[$kgCO_2$]
Modules	1713 kgCO2/kWp	9.76 kWp	16716
Supports	2.73 kgCO2/kg	160 kg	438
Inverters	271 kgCO2/units	1.00 units	271

Рисунок В.1 - Деталізовані значення життєвого циклу та викидів CO_2