

**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

«___» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітня програма Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології

на тему: «Підвищення енергоефективності промислового об'єкту за рахунок модернізації сонячної станції»

Виконав: студент II курсу, групи ГН-41мп

_____ Дученко Андрій Олександрович _____
(прізвище, ім'я по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доц. Веремійчук Ю. А. _____
(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)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент Дученко А.О.

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 «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»

Завідувач кафедри

Олена БОРИЧЕНКО

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Дученку Андрію Олександровичу

1. Тема дисертації «Підвищення енергоефективності промислового об'єкту за рахунок модернізації сонячної станції»
науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Веремійчук Ю. А.
затверджені наказом по університету від 03 листопада 2025 р. №4749-с
2. Строк подання студентом дисертації 19 грудня 2025 року
3. Об'єкт дослідження: процеси електроспоживання та генерації електроенергії на промисловому об'єкті
4. Предмет дослідження: Методи та технічні рішення підвищення ефективності системи електропостачання промислового об'єкту
5. Мета дослідження: Підвищення енергоефективності системи електропостачання промислового об'єкту шляхом модернізації існуючої сонячної електростанції та впровадження сучасних технологій перетворення і накопичення електричної енергії.
6. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) Проаналізувати сучасний

стан та тенденції розвитку сонячної енергетики.

2) Дослідити принципи роботи та технічні характеристики мережесих і гібридних сонячних електростанцій, а також систем накопичення електричної енергії.

3) Проаналізувати технічний стан та ефективність роботи існуючої сонячної електростанції промислового об'єкту.

4) Обґрунтувати доцільність модернізації сонячної електростанції, розробити варіанти її технічного переоснащення з урахуванням режимів електроспоживання об'єкта.

5) Виконати техніко-економічну оцінку запропонованих рішень з модернізації сонячної електростанції

7. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація – наочні матеріали за результатами дослідження

8. Орієнтовний перелік публікацій: Трифонов Д.П., Дученко А.О., Механізми підтримки розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'25» м. Київ; Дата проведення 18-19 листопада 2025р.

9. Консультанти розділів дисертації: Нормоконтроль: Прокопенко І.Д.

10. Дата видачі завдання: 30 жовтня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Отримання завдання	30.10.2025	Вик.
2	Аналіз літературних джерел	01.11.2025	Вик.
3	Робота над розділом: Теоретичні основи сонячної енергетики та її роль у підвищенні енергоефективності	04.11.2025 – 14.11.2025	Вик.
4	Робота над розділом: Методи модернізації сонячної станції	15.11.2025 – 21.11.2025	Вик.
5	Робота над розділом: Оцінка економічної доцільності та ефективності сорединізації	22.11.2025 – 27.11.2025	Вик.

	сонячної станції		
6.	Робота над розділом: Розробка стартап проекту	28.11.2025 – 08.12.2025	Вик.
7.	Оформлення дисертації та презентації	09.12.2025	Вик.
8.	Захист МД	25.12.2025	Вик.

Студент

(підпис)

А.О. Дученко
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Ю. А. Веремійчук
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Підвищення енергоефективності промислового об'єкту за рахунок модернізації сонячної станції» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітня програма «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології», містить 101 сторінку, 20 таблиць, 14 рисунків. Перелік посилань включає 33 найменувань, додатків 3.

Актуальність дослідження зумовлена зростанням вартості електричної енергії для промислових споживачів, необхідністю підвищення енергоефективності виробничих об'єктів та переходом до децентралізованої енергетики з використанням відновлюваних джерел енергії. В умовах обмежених енергетичних ресурсів та нестабільності енергосистеми особливого значення набуває модернізація існуючих сонячних електростанцій шляхом впровадження сучасних фотоелектричних модулів, гібридних інверторів та систем накопичення електроенергії, що дозволяє підвищити рівень власного споживання, зменшити пікові навантаження та забезпечити резервне електропостачання промислових об'єктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерську дисертацію виконано в межах науково-дослідної діяльності кафедри електропостачання Навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Робота відповідає напрямам державної політики у сфері підвищення енергоефективності, розвитку відновлюваної енергетики та зниження енергетичної залежності промислового сектору України.

Мета роботи – Підвищення енергоефективності системи електропостачання промислового об'єкту шляхом модернізації існуючої сонячної електростанції та впровадження сучасних технологій перетворення і накопичення електричної енергії.

Завдання дослідження:

- Проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку сонячної енергетики.
- Дослідити принципи роботи та технічні характеристики мережевих і

гібридних сонячних електростанцій, а також систем накопичення електричної енергії.

- Проаналізувати технічний стан та ефективність роботи існуючої сонячної електростанції промислового об'єкту.
- Обґрунтувати доцільність модернізації сонячної електростанції, розробити варіанти її технічного переоснащення з урахуванням режимів електроспоживання об'єкта.
- Виконати техніко-економічну оцінку запропонованих рішень з модернізації сонячної електростанції

Об'єкт дослідження: процеси електроспоживання та генерації електроенергії на промисловому об'єкті

Предмет дослідження Методи та технічні рішення підвищення ефективності системи електропостачання промислового об'єкту

Наукова новизна: Отримали подальший розвиток підходи до підвищення енергоефективності промислового об'єкту шляхом модернізації існуючої сонячної електростанції з використанням гібридних інверторів та систем накопичення електроенергії, що дало можливість змінити режими споживання електроенергії та продовжити експлуатації обладнання.

Практичне значення: значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання промисловими підприємствами, енергоменеджерами та проєктними організаціями для прийняття рішень щодо модернізації сонячних електростанцій з метою підвищення енергоефективності та зменшення витрат на електропостачання.

Особистий внесок здобувача: Автором самостійно виконано аналіз науково-технічних джерел, досліджено режими роботи сонячної електростанції, проведено енергетичні та економічні розрахунки, а також розроблено проєкт щодо модернізації СЕС промислового об'єкту.

Апробація результатів: Основні положення та результати магістерської дисертації були представлені на Міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'25» [Київ, 18–20 листопада 2025 р.].

Орієнтовний перелік публікацій: Трифонов Д.П., Дученко А.О.,
Механізми підтримки розвитку відновлюваної енергетики в Україні.
Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція
«Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'25» м. Київ;
Дата проведення 18-19 листопада 2025р.

Ключові слова: СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ,
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, МОДЕРНІЗАЦІЯ, ГІБРИДНИЙ ІНВЕРТОР,
СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, ПРОМИСЛОВИЙ ОБ'ЄКТ,
ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ.

ABSTRACT

Master's thesis on the topic “Improving the energy efficiency of an industrial facility by modernizing a solar power station” in the specialty 141 “Electric Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics”, educational program “Energy Management and Energy-Efficient Technologies”, contains 101 pages, 20 tables, 14 figures. The list of references includes 33 titles.

The relevance of the research is determined by the increase in the cost of electricity for industrial consumers, the need to improve the energy efficiency of production facilities, and the transition to decentralized energy using renewable energy sources. In conditions of limited energy resources and instability of the power system, the modernization of existing solar power plants through the introduction of modern photovoltaic modules, hybrid inverters, and electricity storage systems is of particular importance, as it allows to increase the level of own consumption, reduce peak loads, and provide backup power supply to industrial facilities.

Connection of the work with scientific programs, plans, and topics. The master's thesis was completed as part of the research activities of the Department of Power Supply of the Educational and Scientific Institute of Energy Saving and Energy Management of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. The work is in line with state policy in the field of improving energy efficiency, developing renewable energy, and reducing the energy dependence of Ukraine's industrial sector.

The aim of the work is to improve the energy efficiency of the power supply system of an industrial facility by modernizing the existing solar power plant and introducing modern technologies for the conversion and storage of electrical energy.

Research objectives:

- To analyze the current state and trends in the development of solar energy.
- To study the principles of operation and technical characteristics of grid connected and hybrid solar power plants, as well as electrical energy storage systems.
- To analyze the technical condition and operational efficiency of the existing solar power plant at the industrial facility.

- Justify the feasibility of modernizing the solar power plant, develop options for its technical re-equipment, taking into account the electricity consumption modes of the facility.

- Perform a technical and economic assessment of the proposed solutions for modernizing the solar power plant.

Object of study: electricity consumption and generation processes at an industrial facility.

Subject of research: Methods and technical solutions for improving the efficiency of the power supply system of an industrial facility.

Scientific novelty: Scientific novelty: Approaches to improving the energy efficiency of industrial facilities by modernizing existing solar power plants using hybrid inverters and electricity storage systems were further developed, which made it possible to change electricity consumption modes and extend the service life of equipment.

Practical significance: The significance of the results obtained lies in the possibility of their use by industrial enterprises, energy managers, and design organizations to make decisions on the modernization of solar power plants in order to increase energy efficiency and reduce electricity costs.

Personal contribution of the applicant: The author independently analyzed scientific and technical sources, studied the operating modes of the solar power plant, performed energy and economic calculations, and developed a project for the modernization of the industrial facility's solar power plant.

Approval of results: The main provisions and results of the master's thesis were presented at the International Scientific, Technical, and Educational Conference “Energy Management: Status and Development Prospects – PEMS'25” [Kyiv, November 18–20, 2025].

Indicative list of publications: Trifonov D.P., Duchenko A.O., Mechanisms for supporting the development of renewable energy in Ukraine. International Scientific, Technical, Educational, and Methodological Conference “Energy Management: Status and Development Prospects – PEMS'25” Kyiv; Date: November 18–19, 2025.

Keywords: SOLAR POWER PLANT, ENERGY EFFICIENCY, MODERNIZATION, HYBRID INVERTER, ENERGY STORAGE SYSTEMS, INDUSTRIAL FACILITY, ENERGY MANAGEMENT.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЇЇ РОЛЬ У ПІДВИЩЕННІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.....	15
1.1 Поняття та класифікація відновлюваних джерел енергії.....	15
1.2 Види сонячних станцій, їх компоненти та принцип роботи.....	17
1.2.1 Конструкція та типи фотоелектричних модулів.....	21
1.2.2 Різновиди та особливості інверторів для СЕС.....	25
1.2.3 Технології накопичення електричної енергії та їх роль у сучасних енергетичних системах.....	28
1.3 Фактори, що впливають на ефективність роботи сонячних електростанцій.....	31
1.4 Показники енергоефективності та їх значення для промислових об'єктів.....	37
Висновки до розділу 1.....	39
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ МОДЕРНІЗАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	40
2.1 Аналіз існуючого технічного стану сонячної електростанції.....	40
2.2 Модернізація інверторного обладнання	43
2.3 Модернізація фотоелектричних модулів: заміна, реконфігурація, оптимізація.....	47
2.3.1 Розрахунок снігових навантажень.....	52
2.3.2 Розрахунок вітрових навантажень.....	53
2.3.3 Електрична інтеграція оновленого електрообладнання.....	54
2.4 Додавання систем накопичення енергії (BESS) та підбір обладнання.....	55
Висновки до розділу 2.....	58
РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ СОНЯЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	60
3.1 Розрахунок прогнозованої генерації після модернізації	60
3.2 Економічна оцінка модернізації енергетичних систем.....	62
3.3 Оцінка впливу модернізації на енергоефективність промислового	

об'єкта.....	66
3.4 Розрахунок економії коштів та окупності інвестицій.....	67
3.5 Технічне завдання проекту.....	70
3.5.1 Електротехнічне рішення.....	71
3.5.2 Розрахунки для побудови головної схеми електричних з'єднань.....	72
3.5.3 Кабельне господарство.....	75
3.6 Охорона праці.....	76
3.7 Визначення екологічних переваг.....	79
Висновки до розділу 3.....	81
РОЗДІЛ 4 СТАРТАП-ПРОЕКТ.....	83
4.1 Опис стартап-проекту.....	83
4.2 Аналіз ринку	86
4.3 Розробка ринкової стратегії стартап-проекту	89
Висновки до розділу 4.....	92
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96
ДОДАТКИ.....	98

ВСТУП

Підвищення енергоефективності промислових об'єктів є одним із ключових напрямів розвитку енергетичного сектору України в умовах зростання вартості електроенергії, ризиків перерв у електропостачанні та необхідності скорочення енергетичних витрат підприємств. Для промисловості електроенергія виступає не лише ресурсом виробничого процесу, а й чинником конкурентоспроможності: підвищення тарифного навантаження безпосередньо впливає на собівартість продукції, стабільність технологічних режимів і фінансову стійкість бізнесу. У таких умовах відновлювані джерела енергії, насамперед сонячні електростанції (СЕС), стали практичним інструментом часткової компенсації споживання та зменшення залежності від зовнішнього енергопостачання.

Водночас значна кількість промислових СЕС, введених в експлуатацію у попередні роки, сьогодні працює в умовах технічного старіння обладнання та поступової деградації фотоелектричних модулів. Це проявляється у зниженні річної генерації, збільшенні втрат у елементах балансу системи, обмеженнях з боку застарілих інверторів і недостатньому рівні самоспоживання. Окремою проблемою для підприємств є нерівномірність графіка генерації протягом доби: пікове виробництво СЕС часто припадає на години, коли навантаження об'єкта зменшується, що знижує корисність виробленої енергії з точки зору енергоефективності. Тому актуальним стає не лише встановлення нових станцій, а саме модернізація існуючих — як технічний та економічно обґрунтований шлях підвищення ефективності енергопостачання.

Метою даної магістерської є підвищення енергоефективності системи електропостачання промислового об'єкту шляхом модернізації існуючої сонячної електростанції та впровадження сучасних технологій перетворення і накопичення електричної енергії. Для досягнення мети виконуються аналіз вихідних даних і профілю навантаження, оцінка фактичної генерації та причин її зниження, формування варіантів модернізації, а також розгляд інтеграції гібридної архітектури та систем накопичення енергії для підвищення самоспоживання і зменшення пікових навантажень. Очікуваним результатом є

отримання техніко-економічно обґрунтованої моделі модернізації, що забезпечує вимірюваний ефект “до/після” і може бути використана як практичний інструмент для енергоменеджменту промислових підприємств.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЇЇ РОЛЬ У ПІДВИЩЕННІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

1.1 Поняття та класифікація відновлюваних джерел енергії

Відновлювана енергія — це широко вживаний термін, що описує певні види виробництва енергії. У політиці, бізнесі та наукових колах відновлювана енергія часто розглядається як ключове рішення глобальної кліматичної проблеми.

У даний час, через світовий попит, особливо в розвинених і країнах, що розвиваються, необхідні більш стійкі енергетичні технології для заміни традиційних ресурсів виробництва електроенергії, таких як викопне паливо. Енергетичні джерела на основі викопного палива спричиняють шкідливі екологічні проблеми, такі як глобальне потепління і зміна клімату. Викиди парникових газів в атмосферу від виробництва електроенергії за останні кілька десятиліть зросли в геометричній прогресії. Тому для подолання поточної екологічної кризи були впроваджені технології відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), такі як сонячна, вітрова, гідро-, біомаса, геотермальна та воднева енергії. Завдяки своїм екологічним характеристикам та здатності виробляти електроенергію з нульовим або майже нульовим рівнем викидів забруднюючих речовин, ВДЕ привертають все більше уваги через зростання свідомості суспільства щодо чистоти навколишнього середовища.

Зараз відновлювані джерела енергії все ширше використовуються для виробництва електроенергії в усьому світі. Це пов'язано, перш за все, з занепокоєнням суспільства екологічними проблемами, що виникають в результаті використання традиційних методів виробництва електроенергії. П'ять основних груп відновлюваних джерел енергії: сонячна енергія, гідроенергія, вітроенергія, біоенергія та геотермальна енергія, мають свої особливості експлуатації та ефективність перетворення енергії, тому технології ВДЕ залежать від місця розташування та умов [1].

Сонячна енергія — це енергія випромінювання, що випускається Сонцем, і одна з енергій, яка широко використовується в усьому світі. З метою поліпшення та підвищення ефективності перетворення сонячної енергії більшість дослідників вивчають різні технології для оптимізації конструкції системи. Дослідники також оптимізують витрати та перетворення енергії, одночасно зменшуючи вплив на навколишнє середовище. Існує два основних типи систем сонячної енергетики: сонячна теплова енергія та фотоелектрична енергія, які зазвичай використовуються в країнах, що розвиваються, та розвинених країнах. Ці дві системи також поступово вдосконалюються дослідниками для досягнення кращої ефективності.

Сонячна енергія є найпоширенішим і найдинамічнішим відновлюваним джерелом енергії, доступним людству. Сонце безперервно постачає на Землю приблизно 173 000 терават енергії — це в 10 000 разів більше, ніж загальне споживання енергії у світі. Ця надзвичайна доступність у поєднанні зі зниженням вартості технологій та підвищенням ефективності зробила сонячну енергію основою глобальних стратегій у сфері ВДЕ [2].

Фотоелектричні (PV) системи перетворюють сонячне світло безпосередньо в електрику за допомогою напівпровідникових матеріалів, що демонструють фотоелектричний ефект. Коли фотони потрапляють на сонячну батарею, вони збуджують електрони, створюючи електричний струм. Сучасні кристалічні кремнієві панелі досягають ефективності перетворення 18-22%, а передові багатоперехідні комірки перевищують 40% ефективності. Промислові об'єкти все частіше встановлюють на дахах і на землі фотоелектричні масиви для компенсації споживання електроенергії з мережі, використовуючи системи від невеликих кіловатних установок до мегаватних електростанцій промислового масштабу [3].

Системи концентрованої сонячної енергії (CSP) використовують дзеркала або лінзи для концентрації сонячного світла на приймачах, генеруючи інтенсивне тепло, яке приводить в рух звичайні парові турбіни. Технологія CSP пропонує значні переваги для промислових застосувань, що вимагають як електроенергії, так і технологічного тепла. Параболічні жолоби, сонячні вежі та

системи типу «диск-Стірлінг» є основними конфігураціями CSP, а великомасштабні установки досягають ефекту економії масштабу в регіонах з високим рівнем сонячної радіації. Теплова ємність систем CSP дозволяє виробляти електроенергію після заходу сонця, вирішуючи проблему перебоїв у сонячній енергії [4].

1.2 Види сонячних станцій, їх компоненти та принцип роботи

Сонячна електростанція також відома як фотоелектрична (PV) електростанція. Це великомасштабна фотоелектрична установка, призначена для виробництва електроенергії з сонячного випромінювання. Сонячна електростанція використовує для виробництва електроенергії [5]. Вони поділяються на основні 3 типи:

- мережеві сонячні станції
- автономні сонячні станції
- гібридні сонячні станції

Мережеві сонячні електростанції, підключені до мережі або пов'язані з мережею, безпосередньо підключені до громадської електромережі та працюють у синхронізації з електроенергією. Ці системи є найпоширенішою конфігурацією як для житлових, так і для комерційних сонячних установок завдяки своїй простоті та економічній ефективності. Основні компоненти включають фотоелектричні модулі, інвертори, що перетворюють постійний струм на змінний, що відповідає специфікаціям мережі, монтажні конструкції та відповідні захисні пристрої.

Основний принцип роботи полягає в подачі сонячної електроенергії безпосередньо в електричну систему об'єкта, а надлишок виробництва автоматично експортується в мережу. Коли виробництво сонячної енергії перевищує споживання, надлишок енергії надходить у мережу, часто генеруючи кредити за допомогою нетто-лічильників або угод про тарифи на постачання. І навпаки, у періоди недостатнього виробництва сонячної енергії — вночі або в хмарних умовах — об'єкт безперебійно отримує електроенергію з мережі.

Системи, підключені до мережі, мають кілька очевидних переваг, включаючи нижчі початкові інвестиційні витрати в порівнянні з іншими конфігураціями, оскільки вони виключають необхідність у дорогих акумуляторних батареях. Вимоги до технічного обслуговування мінімальні і полягають переважно в періодичному очищенні панелей та моніторингу інверторів. Система максимізує економічну віддачу завдяки політиці нетто-лічильників, яка компенсує власникам експортовану електроенергію. Однак ці установки мають одне критичне обмеження: вони не можуть працювати під час відключень мережі. З міркувань безпеки інвертори автоматично відключаються при відключенні мережі, запобігаючи небезпечному зворотньому живленню, яке може становити загрозу для працівників комунальних служб. Ця залежність від доступності електромережі робить системи, підключені виключно до електромережі, непридатними для об'єктів, що вимагають гарантованого безперебійного електропостачання, таких як медичні установи з критично важливим обладнанням для підтримки життя.

Автономні сонячні електростанції, також звані самостійними або автономними системами, працюють повністю незалежно від громадської електромережі, забезпечуючи самодостатнє виробництво електроенергії для об'єктів у віддалених місцях або там, де підключення до електромережі недоступне, ненадійне або економічно недоцільне. Ці установки складають комплексні енергетичні системи, що включають фотоелектричні масиви, контролери заряду, значну ємність акумуляторних батарей та інвертори, здатні створювати стабільну змінну напругу без зовнішнього підключення до мережі.

Система повинна бути ретельно розроблена, щоб задовольнити всі енергетичні потреби об'єкта в різних сезонних умовах, включаючи тривалі періоди зниженої сонячної інтенсивності [6-8]. Акумуляторні батареї зберігають надлишкову енергію, вироблену в години пікового виробництва, для споживання вночі або в похмурі періоди. Контролери заряду регулюють процеси заряджання, щоб запобігти пошкодженню акумуляторів від перезарядження або надмірного розрядження, що значно подовжує термін їхньої експлуатації [9]. Багато автономних систем також включають резервні

генератори, що працюють на дизельному паливі, пропані або природному газі, щоб забезпечити доступність електроенергії під час тривалих несприятливих погодних умов, коли сонячна енергія та накопичена енергія виявляються недостатніми.

Автономні установки забезпечують повну енергетичну незалежність, що робить їх ідеальними для віддалених медичних клінік, дослідницьких станцій, телекомунікаційних об'єктів або сільських громад, що не мають доступу до електромережі [10-11]. Вони гарантують безперебійне електропостачання незалежно від стану інфраструктури комунальних послуг. Однак ці системи вимагають значно вищих початкових інвестицій через дорогі акумуляторні батареї та резервні генератори. Системи акумуляторних батарей зазвичай становлять 30-40% від загальних витрат на проект і потребують заміни кожні 5-12 років, залежно від технології та моделей використання. Проектування системи повинно передбачати значний надлишок потужності для врахування сезонних коливань і забезпечення надійності, що ще більше збільшує витрати. Вимоги до технічного обслуговування значно вищі, ніж у систем, підключених до електромережі, і передбачають регулярний моніторинг акумуляторів, перевірку рівня електроліту для заливних свинцево-кислотних типів та періодичне обслуговування генераторів.

Гібридні сонячні електростанції представляють собою найдосконалішу і найуніверсальнішу конфігурацію, що поєднує переваги систем, підключених до електромережі, і автономних систем, одночасно пом'якшуючи їхні відповідні обмеження. Ці сучасні установки підтримують підключення до мережі, одночасно включаючи системи акумуляування енергії в акумуляторах та інтелектуальні механізми управління, що забезпечують кілька режимів роботи, оптимізованих для різних умов і цілей (рис. 1.1).

Архітектура системи включає фотоелектричні масиви, двонаправлені інвертори, здатні одночасно керувати потоком енергії між сонячними панелями, акумуляторами, підключенням до мережі та навантаженнями об'єкта, системи акумуляування енергії в акумуляторах та складні системи управління енергією з програмованою логікою. Ця конфігурація дозволяє реалізувати

кілька стратегій роботи: за звичайних умов сонячна енергія живить навантаження об'єкта, заряджаючи батареї або експортує енергію в мережу; під час відключень мережі система автоматично переходить в автономний режим, використовуючи сонячну енергію та енергію, накопичену в батареях, для безперебійного забезпечення критичних навантажень; під час пікових періодів споживання батареї розряджаються, щоб зменшити споживання енергії з мережі та мінімізувати витрати на електроенергію.

Гібридні системи забезпечують оптимальну гнучкість та стійкість, що особливо цінно для медичних закладів, які потребують безперебійного електропостачання для критичного обладнання, а також дають змогу скористатися перевагами підключення до електромережі та можливостями економічної оптимізації. Вони дають змогу реалізувати стратегії згладжування пікових навантажень, що зменшують витрати на електроенергію завдяки уникненню дорогих періодів пікових тарифів, збільшують власне споживання виробленої сонячної енергії, максимізуючи економічну віддачу, та забезпечують резервне електропостачання без повної незалежності від електромережі [12]. Основним недоліком є вищі початкові інвестиції порівняно з простими системами, підключеними до мережі, зазвичай на 40-60% більше через акумуляторні батареї та вдосконалені системи управління. Однак для об'єктів, де надійність електропостачання є надзвичайно важливою, а економічна оптимізація має велике значення, таких як лікарні, служби екстреної допомоги, центри обробки даних та критична інфраструктура, додаткові інвестиції забезпечують значну цінність завдяки підвищеній стійкості, зниженим експлуатаційним витратам та чудовим можливостям управління енергією, що виправдовують вищі капітальні витрати.

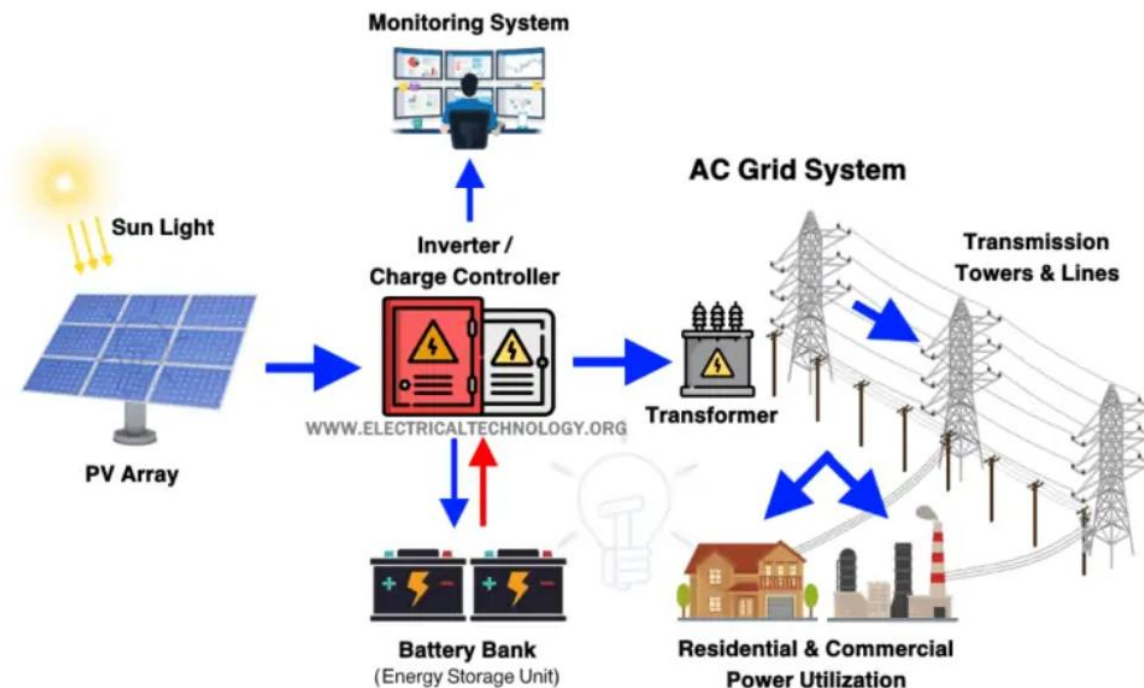


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення роботи СЕС [13]

Основні компоненти сонячної фотоелектричної системи перераховані нижче.

- фотоелектрична (PV) панель
- інвертор
- пристрої для зберігання енергії

1.2.1 Конструкція та типи фотоелектричних модулів

Фотовольтаїка — це пряме перетворення світла в електрику на атомному рівні. Деякі матеріали мають властивість, відому як фотоелектричний ефект, завдяки якій вони поглинають фотони світла і вивільняють електрони. Коли ці вільні електрони уловлюються, утворюється електричний струм, який можна використовувати як електроенергію. Фотоелектричний ефект вперше був помічений французьким фізиком Едмундом Бекерелем у 1839 році, який виявив, що певні матеріали під дією світла виробляють невелику кількість електричного струму. У 1905 році Альберт Ейнштейн описав природу світла і фотоелектричний ефект, на якому базується фотоелектрична технологія, за що пізніше отримав Нобелівську премію з фізики. Перший фотоелектричний

модуль був побудований Bell Laboratories в 1954 році. Він був рекламований як сонячна батарея і був в основному лише цікавинкою, оскільки був занадто дорогим для широкого використання. У 1960-х роках космічна промисловість почала вперше серйозно використовувати цю технологію для забезпечення енергією космічних апаратів. Завдяки космічним програмам технологія вдосконалилася, її надійність була підтверджена, а вартість почала знижуватися. Під час енергетичної кризи 1970-х років фотоелектрична технологія отримала визнання як джерело енергії для некосмічних застосувань [14].

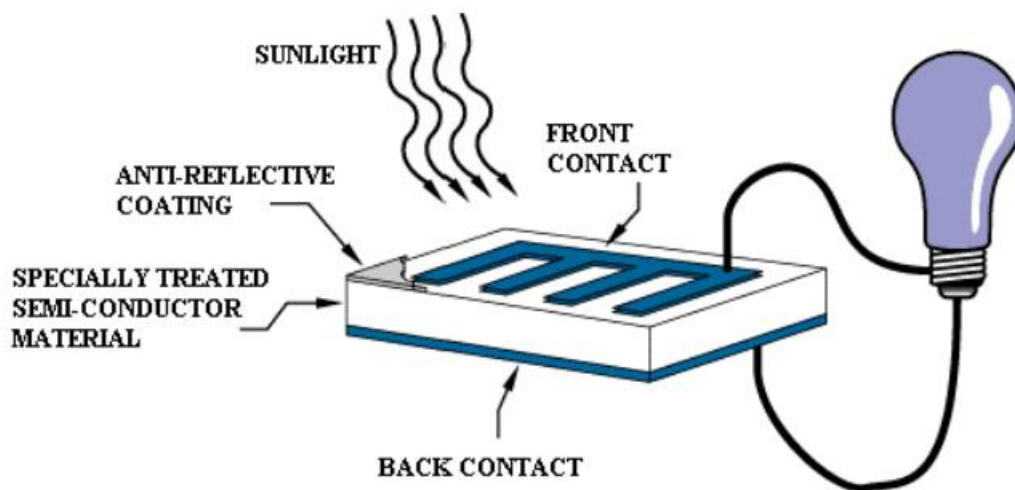


Рисунок 1.2 - Принцип роботи базової фотоелектричної комірки

Фотоелектричні панелі або фотоелектричні модулі є найважливішим компонентом сонячної електростанції. Вони складаються з невеликих сонячних елементів. Це пристрій, який використовується для перетворення енергії сонячних фотонів в електричну енергію. На рисунку 1.2 показано принцип роботи базової фотоелектричної комірки, яка також називається сонячною коміркою. Сонячні комірки виготовляються з тих самих напівпровідникових матеріалів, таких як кремній, що використовуються в мікроелектроніці. Для сонячних комірок тонкий напівпровідниковий пластинчатий матеріал спеціально обробляється для формування електричного поля, позитивного з одного боку і негативного з іншого. Коли світлова енергія потрапляє на сонячну

батарею, електрони вибиваються з атомів напівпровідникового матеріалу. Якщо до позитивного і негативного боків приєднати електричні провідники, утворюючи електричний ланцюг, електрони можуть бути захоплені у вигляді електричного струму, тобто електрики. Ця електрика може бути використана для живлення навантаження, такого як світло або інструмент. Кілька сонячних елементів, з'єднаних між собою електрично і встановлених на опорній конструкції або рамі, називаються фотоелектричним модулем (рис.1.3). Модулі призначені для постачання електроенергії з певною напругою, наприклад, звичайною 12-вольтовою системою. Вироблений струм безпосередньо залежить від кількості світла, що потрапляє на модуль [15].

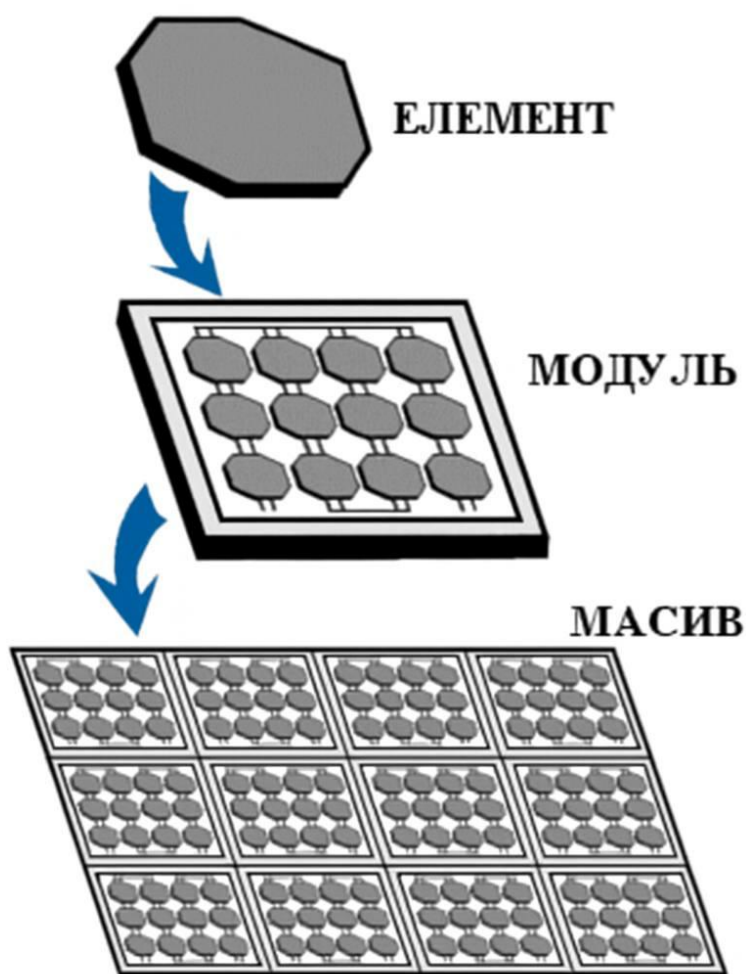


Рисунок 1.3 – Будова фотоелектричного модуля

Кілька модулів можна з'єднати між собою, утворивши масив. Як правило, чим більша площа модуля або масиву, тим більше електроенергії буде вироблено. Фотоелектричні модулі та масиви виробляють електроенергію постійного струму (dc). Їх можна з'єднувати як послідовно, так і паралельно, щоб отримати будь-яку необхідну комбінацію напруги та струму.

Найпоширеніші на сьогоднішній день фотоелектричні пристрої використовують один перехід, або інтерфейс, для створення електричного поля всередині напівпровідника, такого як фотоелектрична комірка. В одноперехідній фотоелектричній комірці тільки фотони, енергія яких дорівнює або перевищує ширину забороненої зони матеріалу комірки, можуть вивільнити електрон для електричного кола. Іншими словами, фотоелектрична реакція одноперехідних комірок обмежується частиною сонячного спектра, енергія якої перевищує ширину забороненої зони поглинаючого матеріалу, а фотони з нижчою енергією не використовуються. Один із способів обійти це обмеження — використовувати дві (або більше) різні комірки з більш ніж однією шириною забороненої зони та більш ніж одним переходом для генерації напруги. Такі комірки називаються «багатоперехідними» (також «каскадними» або «тандемними»). Багатоперехідні пристрої можуть досягти вищої загальної ефективності перетворення, оскільки вони можуть перетворювати більшу частину енергетичного спектру світла в електрику.

Як показано на рисунку 1.4, багатоперехідний пристрій являє собою набір окремих одноперехідних комірок, розташованих у порядку зменшення ширини забороненої зони (E_g). Верхня комірка уловлює високоенергетичні фотони, а решту фотонів передає нижчим коміркам із меншою шириною забороненої зони.

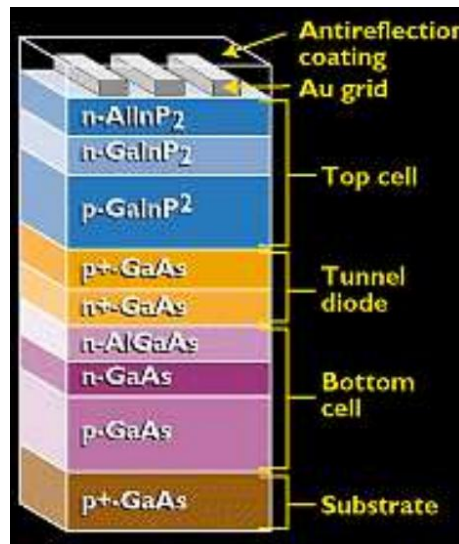


Рисунок. 1.4. Схематичне зображення багатоперехідного пристрою.

Більшість сучасних досліджень багатоперехідних комірок зосереджується на арсеніді галію як одному (або всіх) з компонентів комірок. Такі комірки досягають ефективності близько 35% під впливом концентрованого сонячного світла. Іншими матеріалами, що вивчаються для багатоперехідних пристроїв, є аморфний кремній і диселенід міді та індію. Наприклад, багатоперехідний пристрій, показаний нижче, використовує верхню комірку з фосфіду галію та індію, «тунельний перехід», для сприяння потоку електронів між комірками, і нижню комірку з арсеніду галію [16].

1.2.2 Різновиди та особливості інверторів для СЕС

Вихідна потужність сонячної панелі має форму постійного струму. Більшість навантажень, підключених до мережі енергосистеми, мають форму змінного струму. Тому нам потрібно перетворити вихідну потужність постійного струму в змінний струм. Для цього в сонячних електростанціях використовується інвертор.

У великих електростанціях, підключених до енергомережі, інвертор підключається до спеціальних захисних пристроїв. До інвертора також підключається трансформатор, який забезпечує вихідну напругу і частоту відповідно до стандартних вимог.

Інвертор — це пристрій, який перетворює постійний струм у змінний, відомий як інвертор. Більшість комерційних, промислових та побутових навантажень вимагають джерел змінного струму (АС). Однією з головних проблем джерел змінного струму є те, що їх неможливо зберігати в акумуляторах, де зберігання є важливим для резервного живлення [17].

Інвертори класифікуються за багатьма різними категоріями залежно від джерела вхідного сигналу, типу підключення, вихідної напруги тощо.

Змінюваний струм перетворюється на постійний струм (DC) для зберігання. Полярність джерел постійного струму не змінюється з часом, як джерела змінного струму, тому постійний струм можна зберігати в акумуляторах та ультраконденсаторах. Коли для роботи приладів змінного струму потрібен змінний струм, постійний струм перетворюється назад на змінний для роботи приладів змінного струму. Ви можете ознайомитися з попереднім дописом про змінний та постійний струм і напругу, щоб дізнатися про основні відмінності між ними [18].

Інвертор називається інвертором джерела струму, коли на вхід інвертора подається постійне джерело постійного струму. Жорсткий струм подається на CSI (інвертор джерела струму) від джерела постійного струму, яке має високий імпеданс. Зазвичай для забезпечення жорсткого струму використовується великий індуктор або струм, що регулюється замкнутим контуром. Результуюча хвиля струму є жорсткою і не залежить від навантаження. Вихідний струм змінного струму повністю визначається станом комутаційних пристроїв в інверторі та джерелом постійного струму, що подається.

Вихідна напруга і струм інверторної схеми, v_o , і i_o відповідно, вважаються змінними величинами. Вони зазвичай виражаються в середньоквадратичних значеннях.

Залежно від вихідної напруги та фаз струму, інвертори поділяються на дві основні категорії. Однофазні інвертори та трифазні інвертори.

Однофазний інвертор перетворює вхідний постійний струм в однофазний вихідний струм. Вихідна напруга/струм однофазного інвертора має точно одну фазу з номінальною частотою 50 Гц або 60 Гц та номінальною

напругою. Номінальна напруга визначається як рівень напруги, при якому працює електрична система [19].

Низькі номінальні напруги можна безпосередньо досягти за допомогою інвертора, використовуючи внутрішній трансформатор або схему понижувального-підвищувального перетворювача, тоді як для високих номінальних напруг використовуються зовнішні підвищувальні трансформатори.

Однофазні інвертори використовуються для низьких навантажень. В однофазних інверторах втрати більші, а їхня ефективність нижча порівняно з трифазними інверторами. Тому для високих навантажень перевагу надають трифазним інверторам.

Трифазні інвертори перетворюють постійний струм у трифазну потужність. Трифазна потужність забезпечує три змінних струми, які рівномірно розділені за фазовим кутом. Амплітуди та частоти всіх трьох хвиль, що генеруються на виході (рис. 1.5), однакові з невеликими відхиленнями через навантаження, тоді як кожна хвиля має зсув фази 120° одна від одної [20].

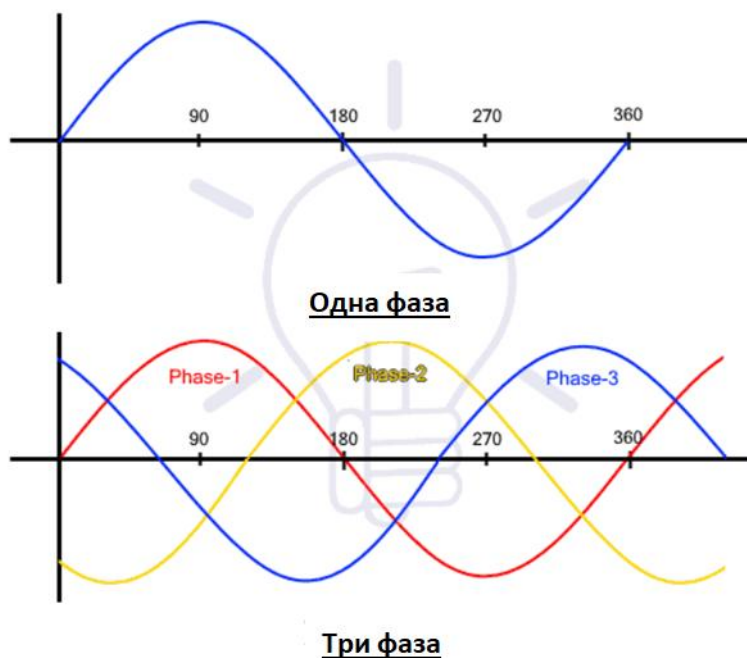


Рисунок 1.5 - Амплітуди та частоти одно- та трифазного інверторів

В основному, один трифазний інвертор складається з 3 однофазних інверторів (рис. 1.6), де фази кожного інвертора віддалені одна від одної на 120 градусів, і кожен однофазний інвертор підключений до одного з трьох клем навантаження.

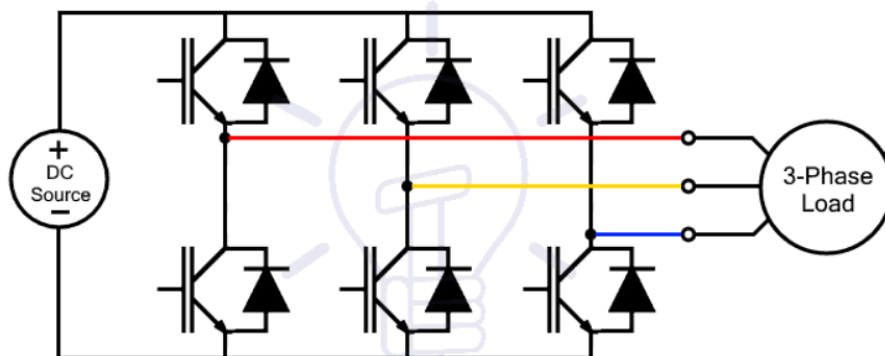


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення будови трифазного інвертора

Існують різні топології для побудови 3-фазної схеми інвертора напруги. У випадку мостового інвертора, що працює в режимі 120 градусів, перемикачі трифазних інверторів працюють таким чином, що кожен перемикач працює від загального часу, що створює вихідну хвильову форму, яка має 6 ступенів. Між негативним і позитивним рівнями напруги прямокутної хвильової форми є ступінь нульової напруги.

Номінальну потужність інвертора можна ще більше збільшити. Для побудови інверторів з високою номінальною потужністю 2 інвертори (трифазні інвертори) з'єднуються послідовно для отримання високої номінальної напруги.

1.2.3 Технології накопичення електричної енергії та їх роль у сучасних енергетичних системах.

Системи зберігання енергії в акумуляторах (BESS) стали революційними компонентами сонячних установок, надаючи можливості, що значно перевищують можливості систем, призначених виключно для генерації. BESS зберігає електричну енергію в хімічній формі в періоди надлишкового виробництва сонячної енергії або низьких цін на електроенергію, а потім вивільняє цю енергію в періоди недостатнього виробництва сонячної енергії,

високих цін на електроенергію або відключень електромережі. Це тимчасове переміщення енергії створює значну економічну цінність, одночасно підвищуючи енергетичну незалежність і надійність.

Основний принцип роботи полягає в оборотних електрохімічних реакціях всередині акумуляторних елементів. Під час заряджання електрична енергія викликає хімічні реакції, які зберігають енергію в молекулярних зв'язках. Під час розряджання зворотні реакції вивільняють збережену енергію у вигляді електроенергії. Система управління батареями (BMS) контролює ці процеси, стежачи за напругою, температурою та станом заряду елементів, одночасно захищаючи від перезарядження, перерозрядження, теплового розгону та інших режимів відмови [21].

BESS складається з декількох основних підсистем, крім самих батарей. Система перетворення енергії (PCS) виконує двонаправлене перетворення постійного струму в змінний, що дозволяє заряджати батареї від сонячного постійного струму або мережевого змінного струму, а також розряджати їх для живлення навантажень або експорту в мережу. Системи терморегулювання підтримують оптимальну робочу температуру за допомогою активного охолодження або нагрівання. Система управління енергією (EMS) реалізує стратегії управління високого рівня, визначаючи, коли заряджати, розряджати або перебувати в режимі очікування, виходячи з сонячної енергії, попиту на навантаження, цін на електроенергію та стану мережі. Системи безпеки, включаючи пожежогасіння та вентиляцію, захищають від небезпечних умов.

Літій-іонні акумулятори домінують у сучасних системах BESS завдяки чудовій енергетичній щільності, ефективності, тривалості циклу та зниженню вартості. Різні хімічні склади літій-іонних акумуляторів забезпечують різні характеристики, придатні для конкретних застосувань. Акумулятори з літій-залізним фосфатом (LFP) забезпечують виняткову безпеку, тривалий цикл роботи (6000–10 000 циклів) та температурну стабільність, що робить їх кращим вибором для стаціонарного зберігання, незважаючи на дещо нижчу енергетичну щільність. Літій-нікель-марганець-кобальт-оксидні (NMC) акумулятори мають вищу енергетичну щільність, що є перевагою для

застосувань з обмеженим простором, хороший цикл експлуатації (3000–5000 циклів) та розумну вартість. Літій-титанатні (LTO) акумулятори мають надзвичайно довгий цикл експлуатації (15 000–25 000 циклів) та чудові характеристики при низьких температурах, але їхня вартість є високою [22].

Принцип роботи полягає в переміщенні іонів літію між катодом і анодом через рідкий електроліт. Під час заряджання іони літію мігрують від катода до анода, накопичуючи енергію. Під час розряджання іони повертаються до катода, вивільняючи енергію. Система управління батареєю контролює сотні окремих елементів, збалансовуючи напругу між ними для максимізації ємності та довговічності. Збалансування елементів запобігає обмеженню продуктивності батареї слабшими елементами, одночасно захищаючи сильніші елементи від перезарядження.

Ефективність циклу — енергія, що відновлюється відносно енергії, що зберігається — зазвичай досягає 85-95% для сучасних літій-іонних систем, що значно вище, ніж у багатьох альтернативних технологіях. Висока ефективність мінімізує втрати енергії під час циклів заряджання-розряджання, що є критично важливим для економічної доцільності застосувань, які часто циклічно використовують батареї.

Термін служби та календарний термін служби визначають довговічність акумулятора. Термін служби вимірює, скільки циклів заряджання-розряджання витримує акумулятор, перш ніж ємність знизиться до 80% від початкової, зазвичай 3000-10 000 циклів залежно від хімічного складу та умов експлуатації. Календарний термін служби вимірює погіршення характеристик з часом, незалежно від циклів, зазвичай 10-20 років. Обидва фактори впливають на загальну вартість володіння та планування заміни.

Чутливість до температури впливає на продуктивність і довговічність літій-іонних батарей. Оптимальна робоча температура становить 15-35 °C; вищі температури прискорюють зниження ємності, а нижчі температури зменшують доступну ємність і потужність. Системи терморегулювання підтримують температуру в оптимальному діапазоні за допомогою рідинного охолодження, повітряного охолодження або резистивного нагрівання за потреби.

Питання безпеки включають запобігання тепловому розгону. Літій-іонні елементи можуть зазнавати каскадних екзотермічних реакцій у разі перезарядження, проколу або впливу високих температур. Ризики зменшуються завдяки декільком рівням безпеки — вентиляції на рівні елементів, відключенню на рівні модулів, гасінню пожежі на рівні стелажів та вентиляції на рівні системи. Сучасні системи демонструють відмінні показники безпеки, якщо вони правильно спроектовані та обслуговуються.

Функція резервного живлення підтримує критичні навантаження під час відключень електромережі. Безперебійні перемикачі або гібридні інвертори з вбудованою функцією резервного живлення виявляють втрату електромережі та миттєво переходять на роботу від акумуляторів без перерви. Селективне скидання навантаження відключає некритичні навантаження, подовжуючи тривалість резервного живлення. Заряджання від сонячної енергії під час тривалих відключень забезпечує необмежене резервне живлення для систем відповідного розміру, хоча хмарна погода обмежує доступну сонячну енергію.

Згладжування сонячної енергії зменшує стрибки потужності, які можуть створювати навантаження на розподільну інфраструктуру або порушувати угоди про взаємоз'єднання. Акумулятори поглинають швидкі коливання виробництва, спричинені хмарними перехідними процесами, стабільно вивільняючи енергію для підтримки стабільного експорту в мережу. Ця функція стає все більш цінною в міру зростання проникнення сонячної енергії та управління операторами мереж більшими портфелями розподіленої генерації.

1.3 Фактори, що впливають на ефективність роботи сонячних електростанцій

Сонячна енергія стала перспективною альтернативою традиційним джерелам енергії завдяки своїй доступності та екологічності. Однак ефективність сонячних енергетичних систем залишається критично важливим питанням, що впливає на їх широке впровадження та практичну життєздатність. Розуміння багатогранних факторів, що впливають на ефективність сонячних

енергетичних систем, є надзвичайно важливим для оптимізації їх роботи та підвищення їх внеску в глобальний енергетичний баланс.

Технологічні досягнення відіграють вирішальну роль у підвищенні ефективності сонячних енергетичних систем. Інновації в конструкції фотоелектричних (PV) елементів, такі як розробка тонкоплівкових, багатоперехідних та перовськітних сонячних елементів, призвели до значного підвищення ефективності перетворення енергії.

Крім того, вдосконалення механізмів сонячного стеження, технологій зберігання енергії та інтеграції систем сприяли максимізації енергетичного виходу та загальної ефективності системи. Окрім технологічних міркувань, екологічні фактори мають значний вплив на ефективність сонячних енергетичних систем. Коливання сонячної інтенсивності, атмосферних умов та географічного розташування значно впливають на енергетичний вихід сонячних панелей. Більше того, такі фактори, як накопичення пилу, затінення та коливання температури, можуть з часом погіршити продуктивність системи, що вимагає ефективних стратегій технічного обслуговування та пом'якшення наслідків. Крім того, соціально-економічні аспекти та аспекти, пов'язані з оптимізацією, впливають на ефективність та впровадження сонячних енергетичних систем.

Фактори, що впливають на ефективність сонячних фотоелектричних систем:

Температура відіграє вирішальну роль в ефективності сонячних панелей. Хоча сонячні панелі призначені для перетворення сонячного світла в електроенергію, на їхню продуктивність можуть впливати коливання температури. Сонячні панелі мають температурний коефіцієнт, який вказує, як їхня ефективність знижується із підвищенням температури. Більшість сонячних панелей втрачають ефективність із підвищенням температури, оскільки матеріали, з яких вони виготовлені, чутливі до температурних змін. Зазвичай із кожним градусом Цельсія підвищення температури вище стандартних умов випробувань (25 °C) ефективність сонячних панелей знижується на певний відсоток. Сонячні панелі працюють ефективніше, коли вони холодніші. Однак

сонячні панелі не тільки поглинають сонячне світло, але й поглинають тепло з навколишнього середовища. Це тепло може призвести до зниження ефективності через збільшення опору в електричних ланцюгах [23].

Робоча температура сонячних панелей залежить від таких факторів, як географічне розташування, час доби та погодні умови. У жаркому кліматі або в години пікового сонячного світла сонячні панелі можуть значно нагріватися, що призводить до зниження ефективності. Деякі сучасні сонячні установки оснащені системами охолодження, щоб протидіяти впливу високих температур. Ці системи можуть варіюватися від простих пасивних методів охолодження, таких як конструкція повітряного потоку, до більш складних активних методів охолодження, таких як циркуляція води або використання охолоджуючих рідин. Високі температури можуть прискорити зношування компонентів сонячних панелей з часом, що призведе до зниження загального терміну служби та ефективності системи сонячних панелей. Правильне управління тепловим режимом має вирішальне значення для збереження ефективності та довговічності сонячних панелей. Сюди входять такі фактори, як орієнтація панелей, відстань між ними та використання затінюючих пристроїв для мінімізації накопичення тепла. Тому, хоча сонячні панелі можуть генерувати електроенергію і в умовах високих температур, їх ефективність може бути нижчою порівняно з більш прохолодними умовами.

Правильне проектування, монтаж та обслуговування є необхідними для оптимізації роботи сонячних панелей в умовах змінної температури.

Інтенсивність сонячного випромінювання є важливим фактором, що визначає ефективність сонячних панелей, оскільки вона відображає кількість сонячного світла, що досягає поверхні панелей на одиницю площі. Сонячні панелі функціонують шляхом перетворення сонячного світла в електроенергію за допомогою фотоелектричного ефекту, при якому фотони сонячного світла вибивають електрони з атомів, створюючи таким чином електричний струм. Отже, інтенсивність сонячного світла безпосередньо впливає на виробництво електроенергії.

Сонячні панелі генерують більше електроенергії, коли отримують вищу інтенсивність сонячного випромінювання. Більше сонячного світла означає більше фотонів, що взаємодіють з фотоелектричними елементами, що призводить до більшого виробництва електроенергії.

Сонячні панелі зазвичай тестуються і оцінюються в стандартних умовах випробувань (STC) при інтенсивності сонячного випромінювання і температурі відповідно 1000 Вт/м² і 25 °C. У цих ідеальних умовах сонячні панелі досягають максимальної ефективності. Однак у реальних умовах інтенсивність сонячного випромінювання може змінюватися протягом дня і в різні пори року, що впливає на фактичну продуктивність сонячних панелей.

Зі зміною рівня інсоляції потужність сонячних панелей також коливається. Наприклад, у похмурі дні або рано вранці чи пізно ввечері рівень інсоляції нижчий, що призводить до зниження виробництва електроенергії. І навпаки, сонячні панелі виробляють більше електроенергії під час пікових годин сонячного світла, наприклад опівдні в ясний день [24].

Рівень інсоляції також варіюється залежно від географічного положення, пори року, погодних умов та інших факторів. Регіони, розташовані ближче до екватора, зазвичай отримують вищий рівень інсоляції протягом року порівняно з віддаленими районами. Розуміння місцевих особливостей інсоляції є важливим для точної оцінки енерговиробництва сонячних систем.

Кут, під яким сонячне світло падає на сонячні панелі, також впливає на інтенсивність сонячного випромінювання і, відповідно, на ефективність сонячних батарей. Сонячні панелі найбільш ефективні, коли сонячне світло падає на них перпендикулярно.

Зі збільшенням кута падіння ефективна інтенсивність сонячного випромінювання зменшується, що знижує продуктивність сонячних панелей.

Вплив високої температури на ефективність сонячної енергії має вирішальне значення для розуміння продуктивності сонячних енергетичних систем. Висока температура впливає на ефективність сонячної енергії наступним чином:

Температурний коефіцієнт, це міра ступеня зниження ефективності сонячних панелей з кожним градусом Цельсія підвищення температури. Сонячні панелі найбільш ефективні при нижчих температурах, але з підвищенням температури їх ефективність знижується.

Вищі температури можуть знизити вихідну напругу сонячних панелей, що, в свою чергу, впливає на їх здатність ефективно генерувати електроенергію. Це зниження вихідної напруги в кінцевому підсумку призводить до зниження загального виробництва електроенергії.

Сонячні панелі поглинають сонячне світло, перетворюючи його на електроенергію, але вони також поглинають теплову енергію. Коли панелі надто нагріваються, вони стають менш ефективними у перетворенні сонячного світла на електроенергію. Тому ефективні механізми відведення тепла мають вирішальне значення для підтримання оптимальної ефективності. Деякі сучасні сонячні установки оснащені системами охолодження для пом'якшення впливу високих температур на ефективність сонячних панелей. Ці системи охолодження можуть використовувати пасивні методи охолодження, такі як конструкція повітряного потоку, або активні методи охолодження, такі як системи циркуляції води, для вирішення проблем нагрівання.

Температурний коефіцієнт та його вплив на ефективність сонячної енергії можуть варіюватися залежно від географічного розташування. У районах з вищими середніми температурами може спостерігатися більш значне зниження ефективності під час спекотної погоди порівняно з прохолоднішими регіонами.

Вплив низької температури на ефективність сонячних батарей є вирішальним для розуміння продуктивності сонячних енергетичних систем. Низька температура впливає на ефективність сонячних батарей наступним чином:

Зі зниженням температури напівпровідникові матеріали, що використовуються в сонячних батареях, проводять електрику менш ефективно, що призводить до зниження продуктивності. Крім того, низькі температури

можуть збільшити внутрішній опір сонячних панелей, що, в свою чергу, зменшує потік електрики та знижує загальну ефективність.

Сонячні панелі також мають тепловий коефіцієнт, який вказує, як їх ефективність знижується

зі збільшенням температури. Різні типи сонячних панелей мають різні теплові коефіцієнти, але, як правило, зниження температури призводить до підвищення ефективності.

У районах, де часто випадає сніг, снігові накопичення на сонячних панелях можуть блокувати сонячне світло значно знижувати ефективність, поки сніг не буде прибрано. Ось чому важливо регулювати кут нахилу сонячних панелей, щоб максимізувати вплив сонячного світла і зменшити вплив снігових накопичень у районах, схильних до снігопадів.

Низькі температури також можуть впливати на продуктивність акумуляторів в автономних сонячних системах, які використовують акумулятори для зберігання енергії. Низькі температури можуть зменшити ємність акумуляторів і уповільнити хімічні реакції, що призведе до зниження загальної ефективності системи. Для боротьби з цим можна використовувати системи обігріву акумуляторів, щоб підтримувати їх продуктивність при низьких температурах.

Стратегії зменшення впливу низьких температур на ефективність сонячних фотоелектричних систем

1) Регулювання кута нахилу сонячних панелей може допомогти максимізувати вплив сонячного світла та зменшити вплив снігового покриву.

2) Забезпечення належної ізоляції під та навколо сонячних панелей може допомогти зберегти тепло, зменшивши деякі втрати ефективності, пов'язані з низькими температурами.

3) Деякі сучасні сонячні установки також оснащені системами обігріву, щоб запобігти накопиченню снігу та підтримувати оптимальну робочу температуру панелей.

1.4 Показники енергоефективності та їх значення для промислових об'єктів

У міру того як промислові об'єкти все частіше переходять на відновлювані джерела енергії з метою зниження експлуатаційних витрат і вуглецевого сліду, сонячні електростанції стають важливою інфраструктурною інвестицією. Розуміння та моніторинг ефективності сонячних систем за допомогою конкретних показників енергоефективності дозволяє об'єктам максимізувати віддачу від цих значних капіталовкладень, забезпечуючи при цьому надійне та стає виробництво електроенергії.

Коефіцієнт ефективності (PR) є найповнішим показником для сонячних установок, який вимірює фактичну енергетичну продуктивність у порівнянні з теоретичною максимальною продуктивністю в ідеальних умовах. Виражений у відсотках, PR враховує всі втрати системи, включаючи вплив температури, неефективність інвертора, забруднення, затінення та простої. Сонячні установки світового класу досягають значень PR від 80 до 85%, тоді як системи, що погано обслуговуються або спроектовані, можуть опускатися нижче 70%. Для промислових об'єктів моніторинг тенденцій PR дозволяє виявити погіршення стану, потреби в технічному обслуговуванні та можливості оптимізації.

Показник конкретної потужності вимірює фактичне виробництво електроенергії на встановлений кіловат потужності, зазвичай виражається в кіловат-годинах на кіловат-пік ($\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{кВт} \cdot \text{пік}$) на рік. Цей показник дозволяє порівнювати різні сонячні установки незалежно від їх розміру та допомагає об'єктам оцінити, чи працюють їхні системи відповідно до проектних специфікацій. Географічне розташування значно впливає на конкретний вихід, значення якого коливається від 900 $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{кВт} \cdot \text{пік}$ у північних кліматичних умовах до понад 2000 $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{кВт} \cdot \text{пік}$ в оптимальних пустельних місцевостях.

Коефіцієнт потужності розраховує співвідношення фактичної потужності до потенційної потужності, якщо система працює на повну потужність безперервно. Коефіцієнти потужності сонячних установок зазвичай коливаються в діапазоні 15-25%, що відображає переривчастий характер

сонячного світла. Промислові об'єкти використовують цей показник для енергетичного планування та визначення оптимального поєднання сонячних та традиційних джерел енергії [25].

Ефективність інвертора відстежує, наскільки ефективно постійний струм від панелей перетворюється на змінний струм для використання на об'єкті. Сучасні інвертори досягають ефективності 96-98%, і моніторинг цього показника дозволяє виявити проблеми з обладнанням, перш ніж вони суттєво вплинуть на виробництво.

Ці показники безпосередньо впливають на економіку промислових об'єктів, кількісно оцінюючи фінансову віддачу від інвестицій у сонячну енергію. Сонячна система, яка не досягає своїх проектних характеристик лише на 10%, може коштувати об'єктам десятки тисяч доларів щорічно у вигляді втраченого виробництва. Моніторинг продуктивності дозволяє проводити профілактичне обслуговування, таке як чищення панелей або ремонт інверторів, запобігаючи дорогому зносу.

Для об'єктів, що переслідують цілі сталого розвитку, показники ефективності сонячної енергії демонструють прогрес у досягненні цілей у сфері відновлюваної енергії та зобов'язань щодо скорочення викидів вуглецю. Вони надають перевірені дані для корпоративної звітності, комунікацій з інвесторами та екологічної сертифікації.

Крім того, ці показники слугують основою для стратегічних рішень щодо розширення систем, інтеграції систем зберігання енергії та угод про купівлю електроенергії, забезпечуючи оптимізацію портфелів відновлюваної енергії промислових об'єктів для довгострокового успіху в експлуатації та охороні навколишнього середовища.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі викладено основні теоретичні та технічні засади для розуміння систем сонячної енергії та їх застосування для підвищення енергоефективності в медичних та профілактичних установах. Аналіз показує, що відновлювані джерела енергії, зокрема сонячна фотоелектрична технологія,

є життєздатними та дедалі більш економічно ефективними рішеннями для зменшення залежності від традиційної електроенергії з мережі, одночасно знижуючи експлуатаційні витрати та вплив на довкілля.

Класифікація сонячних електростанцій за підключенням до електромережі — мережеві, автономні та гібридні конфігурації — показує, що гібридні системи забезпечують оптимальну функціональність, поєднуючи енергетичну незалежність з економічною ефективністю та безперебійним електропостачанням для критично важливого обладнання. Сучасні фотоелектричні модулі, що використовують монокристалічні та двосторонні технології, забезпечують значно вищу ефективність перетворення енергії порівняно з попередніми поколіннями.

Системи зберігання енергії, зокрема літієво-залізні фосфатні батареї, стали важливими компонентами, що забезпечують стратегії згладжування пікових навантажень, резервне електропостачання та підвищене власне споживання виробленої сонячної енергії. Аналіз факторів ефективності, включаючи географічне розташування, орієнтацію установки, затінення, вплив температури та зношування системи, надає важливу інформацію для оптимізації продуктивності сонячних електростанцій протягом усього терміну їх експлуатації, що безпосередньо впливає на стратегію модернізації, розглянуту в наступних розділах.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ МОДЕРНІЗАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1 Аналіз існуючого технічного стану сонячної електростанції

Комплексна технічна оцінка існуючої сонячної електростанції є основою для будь-якого успішного проекту модернізації. Для об'єкта, що працює з фотоелектричними модулями та інверторами 2010 року випуску, притаманний високий ступінь старіння, технологічного застарівання та накопичених недоліків є необхідним для розробки економічно ефективних стратегій модернізації.

Таблиця 2.1 містить систематизований перелік основного технологічного обладнання, встановленого на даховій мережевій електростанції потужністю 30 кВт, спроектованої на базі фотомодулів Trina Solar TSM-DC01A Comax потужністю 200 W_p та мережевого інвертора Growatt 30000UE. Таблиця узагальнює складові елементи станції відповідно до їх функціонального призначення, конструктивних особливостей та вимог електротехнічної безпеки.

Основна частина обладнання охоплює генераційну частину СЕС — фотоелектричні модулі та мережевий інвертор. Саме ці компоненти формують номінальну встановлену потужність станції та забезпечують перетворення сонячної енергії на електричну у вигляді змінного струму, придатного для подальшого використання в електромережі. Кількість фотомодулів визначено виходячи з потужності одного модуля, що дозволяє сформувати загальну потужність у 30 кВт_p, тоді як інвертор Growatt 30000UE забезпечує необхідний рівень перетворювання та синхронізації з мережею.

Захисні компоненти включають допоміжне електротехнічне обладнання, що забезпечує безпечну експлуатацію СЕС: комбайнерні бокси, захисну апаратуру постійного та змінного струму, роз'єднувачі, пристрої захисту від перенапруг (SPD). Наявність цих елементів є обов'язковою для відповідності галузевим стандартам та вимогам оператора системи розподілу.

Третій блок охоплює монтажні та інфраструктурні компоненти — систему кріплень для дахової поверхні, заземлення, блискавкозахист, комунікаційні модулі та щити обліку. Ці елементи забезпечують механічну стабільність та електричну безпеку роботи станції. Додатково враховані витратні матеріали, необхідні для виконання монтажних робіт та організації кабельних трас.

Таблиця 2.1 - Перелік обладнання СЕС 30 кВт

№	Обладнання	Кількість	Примітка
1	Фотомодуль Trina Solar TSM-DC01A Comax 200 Wp	150 шт.	Загальна потужність 30 кВт (150 × 200 Вт)
2	Мережевий інвертор Growatt 30000UE	1 шт.	3-фазний, номінал 30 кВт
3	Система кріплень для даху	Комплект	Під конкретний тип покрівлі, на 150 модулів
4	DC-комбайнер	1–2 шт.	Захист та об'єднання стрінгів
5	Роз'єднувач DC	1 шт.	Може бути вбудований в інвертор
6	DC кабель PV 4–6 мм ²	400–500 м	Для з'єднання модулів у стрінги
7	АС кабель 5×10–16 мм ²	20–40 м	Підключення інвертора до щита АС
8	Автоматичний вимикач АС 3-фазний	1 шт.	Номінал 63–80 А
9	SPD DC – захист від перенапруг	1 комплект	Категорія DC для PV
10	SPD AC – захист від перенапруг	1 комплект	Категорія АС
11	Система заземлення	1 комплект	Заземлення інвертора, конструкцій та щитів
12	Блискавкозахист	1 комплект	За потреби, залежно від будівлі
13	Лічильник двонапрямний	1 шт.	Встановлюється оператором ОСР
14	Комунікаційний модуль Growatt (WiFi/LAN)	1 шт.	Моніторинг ShineWeb
15	Щити АС/DC та обліку	2–3 шт.	Щит інвертора, обліку та захистів
16	Витратні матеріали	Комплект	Клеми, гофра, труби, маркування тощо

Таким чином, таблиця 2.1 репрезентує комплексний структурований перелік обладнання, що охоплює всі ключові елементи СЕС, технічно

збалансованої та безпечної дахової сонячної електростанції потужністю 30 кВт. Вона дозволяє оцінити масштаб проєкту, визначити обсяг необхідних ресурсів та забезпечити узгодженість між проєктувальними і монтажними рішеннями.

На рисунку 2.1 подано узагальнену схему підключення мережевої сонячної електростанції, яка демонструє структурну взаємодію основних елементів фотоелектричної системи та послідовність перетворення енергії від сонячного випромінювання до електричної мережі споживача. Схема відображає функціональні зв'язки між фотоелектричними модулями, інверторним обладнанням та системою електрозахисту, що забезпечує надійну та безпечну роботу СЕС відповідно до чинних нормативних вимог.

На схемі зображено фотоелектричні модулі, які виконують роль первинного перетворювача сонячної енергії у електричну енергію постійного струму. Їх вихідний ланцюг підключено до інвертора через комутаційно-захисні пристрої постійного струму, що включають автоматичні вимикачі, запобіжники та роз'єднувачі.

Центральним елементом схеми є мережевий інвертор, що виконує ключову функцію перетворення електроенергії постійного струму у електроенергію змінного струму з параметрами, сумісними з електромережею (напругою, частотою та фазністю).

Також представлено підключення до електричної мережі через систему захисту змінного струму, яка включає автоматичні вимикачі, пристрої захисту від перенапруг та заземлювальні елементи. Ці компоненти виконують важливу роль у забезпеченні електробезпеки, захисту обладнання від імпульсних перенапруг та стабільності роботи всієї системи. Подача електроенергії до внутрішньої системи споживача здійснюється через обліковий вузол, що забезпечує точний вимір виробленої та відпущеної електроенергії.

Таким чином, подана схема дозволяє наочно продемонструвати структуру та принцип роботи мережевої СЕС, відображаючи взаємозв'язок її основних функціональних компонентів та забезпечуючи розуміння алгоритму руху електроенергії від генерації до точок споживання.

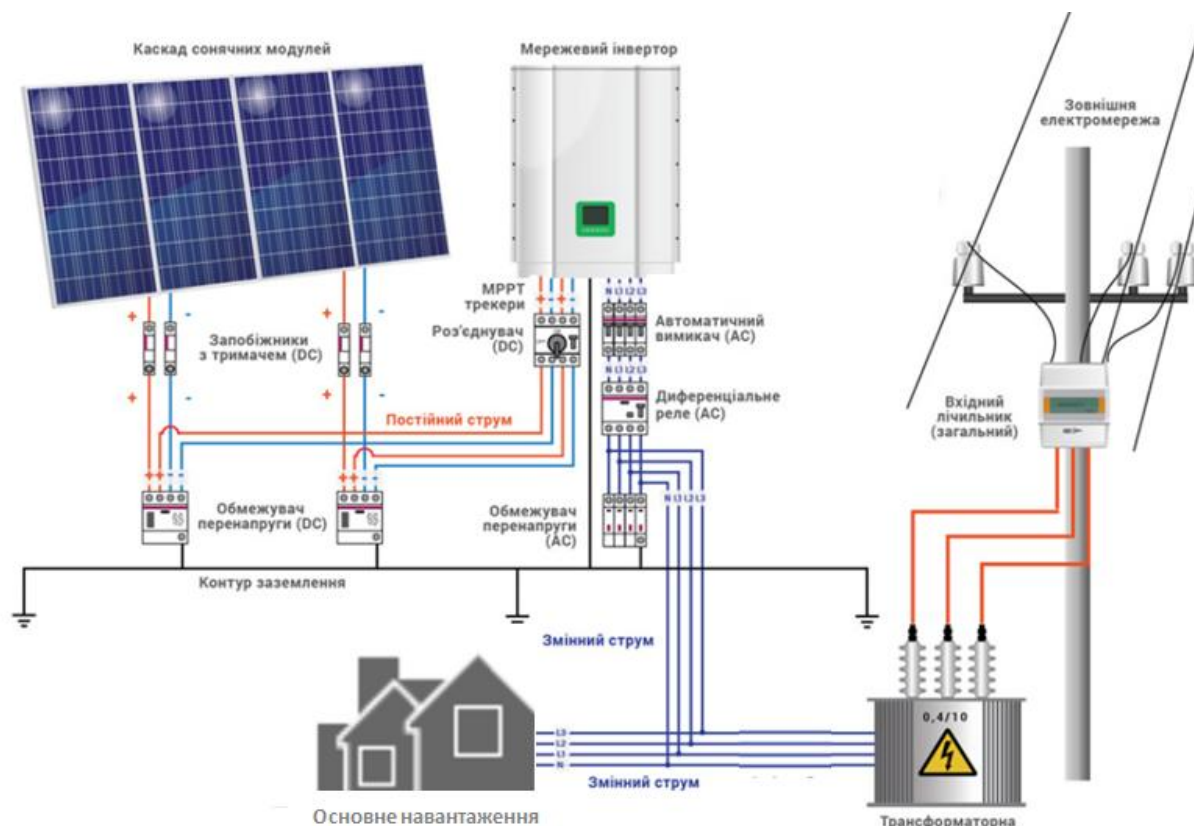


Рисунок 2.1 - Узагальнена схема підключення мережевої СЕС

2.2 Модернізація інверторного обладнання

Оцінка надійності інвертора починається з аналізу історії експлуатації. Електролітичні конденсатори, найбільш схильні до виходу з ладу компоненти інвертора, зазвичай зношуються через 8-12 років, що призводить до збільшення пульсацій струму, зниження ефективності та, зрештою, виходу з ладу. Вентилятори охолодження, якщо вони є, можуть працювати неефективно або з перебоями, що призводить до зниження теплової потужності, яке зменшує вихідну потужність під час пікових періодів генерації.

У таблиці 2.2 наведено порівняння мережевого інвертора Growatt 30000UE та гібридного інвертора Deye SUN50K-SG01HP3-EU-BM4, що представляють різні технологічні підходи до перетворення та керування електроенергією у фотоелектричних системах. Growatt 30000UE є класичним on-grid інвертором, призначеним виключно для відпуску електроенергії в мережу, тоді як Deye SUN50K має гібридну архітектуру, що дозволяє

працювати з акумуляторними системами, забезпечувати резервне живлення та виконувати функції оптимізації енергоспоживання.

Таблиця 2.2 - Порівняння характеристик використовуваних інверторів

Параметр	Мережевий інвертор Growatt 30000UE (30 кВт)	Гібридний інвертор Deye SUN50K-SG01HP3-EU-BM4 (50 кВт)
Тип інвертора	Мережевий (on-grid), без підтримки акумуляторів	Гібридний (on-grid + робота з АКБ, енергозбереження)
Призначення	Перетворення енергії ФЕМ у змінний струм та передача в мережу	Робота з ФЕМ, заряд/розряд АКБ, живлення навантажень і робота з мережею
Номінальна вихідна потужність, кВт	≈ 30 кВт АС (трифазний)	50 кВт АС (трифазний)
Рекомендована макс. PV потужність	~40–45 кВт _р	65 кВт _р
Кількість MPPT-трекерів	2–3	4 MPPT
Тип мережі	3/N/PE, 400 В, 50 Гц	3/N/PE, 230/400 В, 50/60 Гц
Максимальна вхідна напруга DC	До 1000 В DC	1000 В DC
Діапазон робочої напруги MPPT	Орієнтовно 200–800 В	150–850 В DC
Підтримка акумуляторів	Відсутня, робота лише з мережею	Є, високовольтна батарея 160–800 В, можливість двостороннього енергообміну (заряд/розряд)
Максимальний струм заряд/розряд АКБ	–	50 + 50 А (канали заряду АКБ) (Зелена Енергія)
ККД (макс. ефективність)	До ≈97,5 %	До ≈97,6–98,5 %
Захист від перенапруг (SPD)	Типово: SPD Type II по DC та АС	SPD DC Type II / АС Type III, інтегровано в інвертор
Функції роботи з мережею	Класичний on-grid інвертор: відпуск у мережу	Розширені функції: self-consumption, peak-shaving, робота в режимі резерву, можливість паралельної роботи з іншими інверторами
Типові області застосування	Класичні мережеві СЕС: дахові, наземні, комерційні системи без потреби накопичення енергії	Комерційні та промислові об'єкти з потребою резервування, оптимізації пікових навантажень і збільшення частки самоспоживання

Аналіз показує, що гібридні інвертори нового покоління, такі як Deye, значно перевершують традиційні мережеві рішення за функціональністю: вони

підтримують багатоточкове відстеження максимальної потужності (4 MPPT), мають вищу сумарну рекомендовану потужність фотоелектричних полів та можуть взаємодіяти з акумуляторними батареями високої напруги. Це робить їх придатними для сучасних енергетичних систем, які потребують не лише генерації, а й гнучкого управління енергією. Натомість Growatt 30000UE залишається ефективним рішенням для станцій, де не передбачено накопичення енергії та резервування [26-27].

Сучасні інвертори функціонують як складні платформи для збору даних та комунікації, надаючи інформацію, яка була немислимою для обладнання 2010 року. Інтерфейси Ethernet, Wi-Fi та стільникового зв'язку забезпечують дистанційний моніторинг, оновлення прошивки та інтеграцію з системами управління енергією. В обладнанні виробника NINGBO DEYE використовуються сучасні логери (рис. 2.2), які в реальному часі зчитують усі дані з інвертора, а саме: потужність навантаження, потужність генерації, ємність акумулятора, потужність віддачі електроенергії в мережу, і т.д. Усі дані записуються на серверах NINGBO DEYE, що у свою чергу через значний період використання обладнання дозволяє отримати повну статистику даних щодо сонячної станції.



Рисунок 2.2 – Логер виробника Deye для зчитування даних інвертора

Дані про продуктивність у реальному часі охоплюють широкий спектр параметрів: миттєве та сукупне виробництво енергії, вхідна напруга та струм постійного струму для кожного каналу MPPT, вихідна напруга та струм змінного струму для кожної фази, коефіцієнт потужності, частота, ефективність та внутрішні температури. Коди несправностей та попередження надають діагностичну інформацію, що прискорює усунення несправностей. Історичні дані реєструються для аналізу та звітності.

Інтеграція даних на рівні модулів дозволяє інверторам агрегувати інформацію від оптимізаторів потужності або систем моніторингу, забезпечуючи безпрецедентну видимість продуктивності окремих модулів. Ці детальні дані дозволяють виявити конкретні модулі з низькою продуктивністю, затінення або проблеми з деградацією, які неможливо виявити за допомогою моніторингу на рівні ланцюгів.

Можливості зв'язку з мережею дозволяють брати участь у реагуванні на попит та динамічному реагуванні на ціноутворення. Інвертори можуть отримувати сигнали від комунальних підприємств або агрегаторів для обмеження потужності під час надзвичайних ситуацій, регулювання коефіцієнта потужності для підтримки напруги або оптимізації часу виробництва на основі ціноутворення за часом використання. Ця функціональність створює нові можливості для отримання доходу через ринки допоміжних послуг.

Веб-платформи моніторингу, доступні з комп'ютерів, планшетів і смартфонів, надають інтуїтивно зрозумілі панелі управління (рис. 2.3), що відображають виробництво, умови навколишнього середовища та стан системи. Повідомлення електронною поштою сповіщають операторів про несправності, що вимагають уваги. Мобільні додатки дозволяють технічним спеціалістам на місці отримати доступ до діагностичної інформації та дистанційно налаштувати параметри під час усунення несправностей.

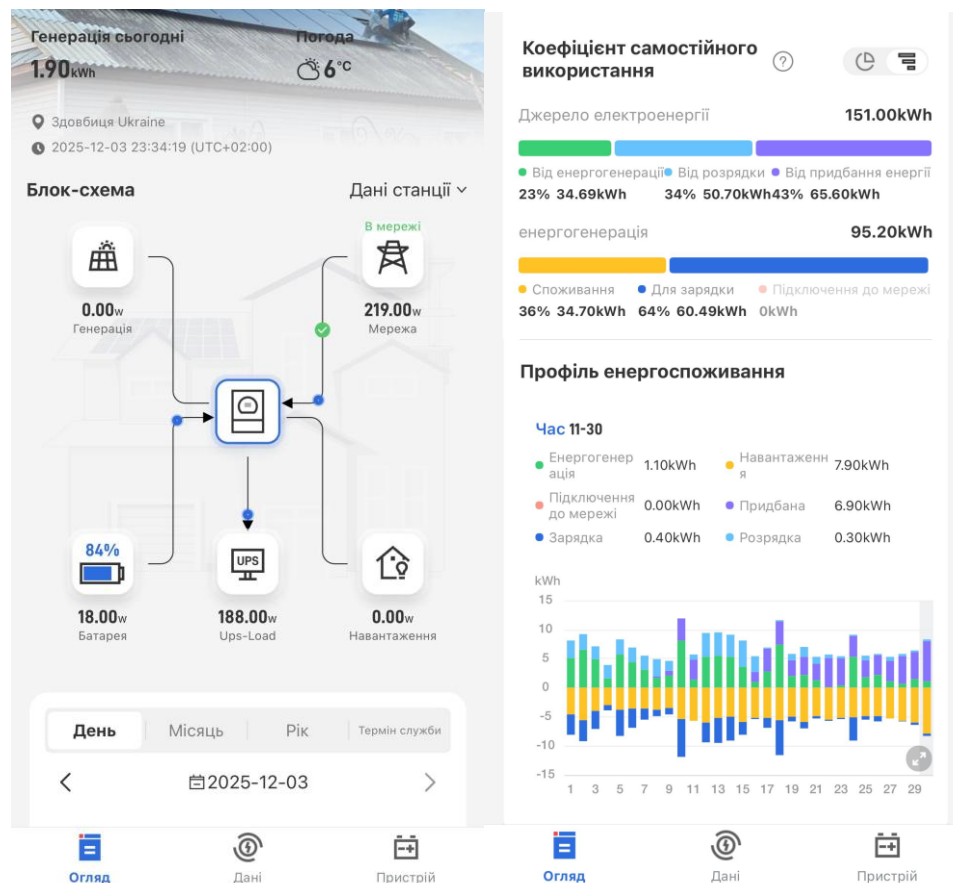


Рисунок 2.3 – Панель управління додатком

Модульна конструкція полегшує технічне обслуговування та ремонт. Компоненти, що замінюються на місці, такі як вентилятори, комунікаційні карти або силові модулі, забезпечують швидке обслуговування без заміни всього інвертора. Модульні запобіжники або автоматичні вимикачі на вході постійного струму спрощують ізоляцію ланцюга під час усунення несправностей. Ця зручність обслуговування різко контрастує зі старими герметичними пристроями, які вимагають повної заміни в разі несправності.

2.3 Модернізація фотоелектричних модулів: заміна, реконфігурація, оптимізація

З 2010 року фотоелектрична промисловість зазнала значного технологічного прогресу, що зробило заміну модулів однією з найефективніших стратегій модернізації. Сучасні модулі забезпечують значно вищу вихідну потужність, підвищену ефективність, покращену довговічність та

довший термін гарантії порівняно з технологією, що існувала п'ятнадцять років тому. Розуміння цих досягнень дозволяє зробити обґрунтований вибір модулів для заміни, що максимізує віддачу від інвестицій у модернізацію.

Вихідна потужність значно зросла завдяки численним інноваціям. Модулі 2010 року зазвичай виробляли 200-240 Вт з ефективністю комірок 14-16%. Сучасні монокристалічні модулі PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) зазвичай забезпечують 400-550 Вт з ефективністю, що перевищує 20-22%. Це збільшення щільності потужності означає, що та сама фізична площа генерує більше ніж удвічі більше електроенергії або еквівалентну потужність від половини модулів, що значно знижує витрати на баланс системи [22].

Фотоелектричні модулі, яким зараз приблизно п'ятнадцять років, були встановлені на підприємстві: Trina Solar TSM-DC01A Comax 200Wp (Додаток 1) зараз зазнали значного зниження продуктивності через низку механізмів.

На рисунку 2.4 зображена схема розкладки фотомодулів на даху підприємства після монтажу в 2010 року.

Кристалічні кремнієві модулі зазвичай демонструють щорічні показники зниження продуктивності на 0,5-0,8%, що означає, що ці панелі, ймовірно, втратили 7-12% своєї початкової потужності. Однак модулі старішого покоління часто мають вищі показники зниження продуктивності через менш досконалі матеріали для герметизації та виробничі процеси.

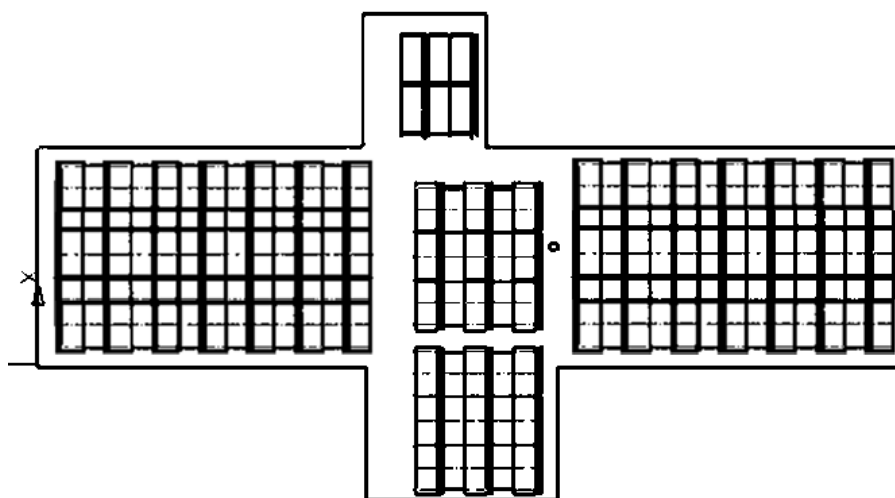


Рисунок. 2.4 – Схема розкладки фотомодулів

Дефекти на рівні комірок стають все більш поширеними в старіючих модулях. Мікротріщини в кремнієвих комірках, часто невидимі неозброєним оком, але виявляються за допомогою електролюмінесцентної візуалізації, створюють шляхи з високим опором, що зменшують протікання струму. Роз'єми та кабелі потребують ретельного огляду. Корозія електричних з'єднань, особливо у вологих або прибережних умовах, збільшує опір і створює потенційну небезпеку пожежі. Ізоляція кабелів може стати крихкою і тріснути, оголюючи провідники під впливом навколишнього середовища.

Таблиця 2.3 – Порівняння фотомодулів

Параметр	Trina Solar TSM-DC01A Comax 200 Wp	LONGi Solar LR5- 72HPH-550M
Виробник	Trina Solar	LONGi Solar
Номинальна потужність	200 Wp	550 Wp
Технологія елементів	Полікристалічний кремній	Монокристалічний кремній
ККД модуля	≈ 15,6 %	≈ 21,5 %
Напруга в точці макс. потужності	39,3 В	41,95 В
Струм у точці макс. потужності I_{mp}	5,2 А	13,12 А
Напруга холостого ходу V_{oc}	45,4 В	49,8 В
Струм короткого замикання I_{sc}	5,5 А	13,98 А
Маса	≈ 17 кг	≈ 27,2 кг

Вибір модуля LONGi Solar LR5-72HPH-550M є доцільним завдяки його значно вищій ефективності та сучасним технологічним характеристикам порівняно з Trina Solar TSM-DC01A Comax 200 Wp (коротке порівняння фотомодулів наведено в таблиці 2.3). Модуль LONGi має потужність 550 Wp, що майже у три рази перевищує потужність старого модуля, забезпечуючи більше виробництво електроенергії при менших витратах площі та обладнання. Завдяки технології half-cell та багатошинній структурі, модуль демонструє вищу продуктивність у реальних умовах та кращу стійкість до затінення. Підтримка системної напруги 1500 В дозволяє створювати довші стрінги та

зменшити втрати в кабельних лініях. Загалом, LONGi 550 MBт є більш енергоефективним, технологічно сучасним та економічно вигідним рішенням для модернізації сонячних станцій.

На рисунку 2.5 зображено найоптимальній варіант розташування 182 одиниць фотоелектричних модулів для досягнення найбільш ефективного результату.

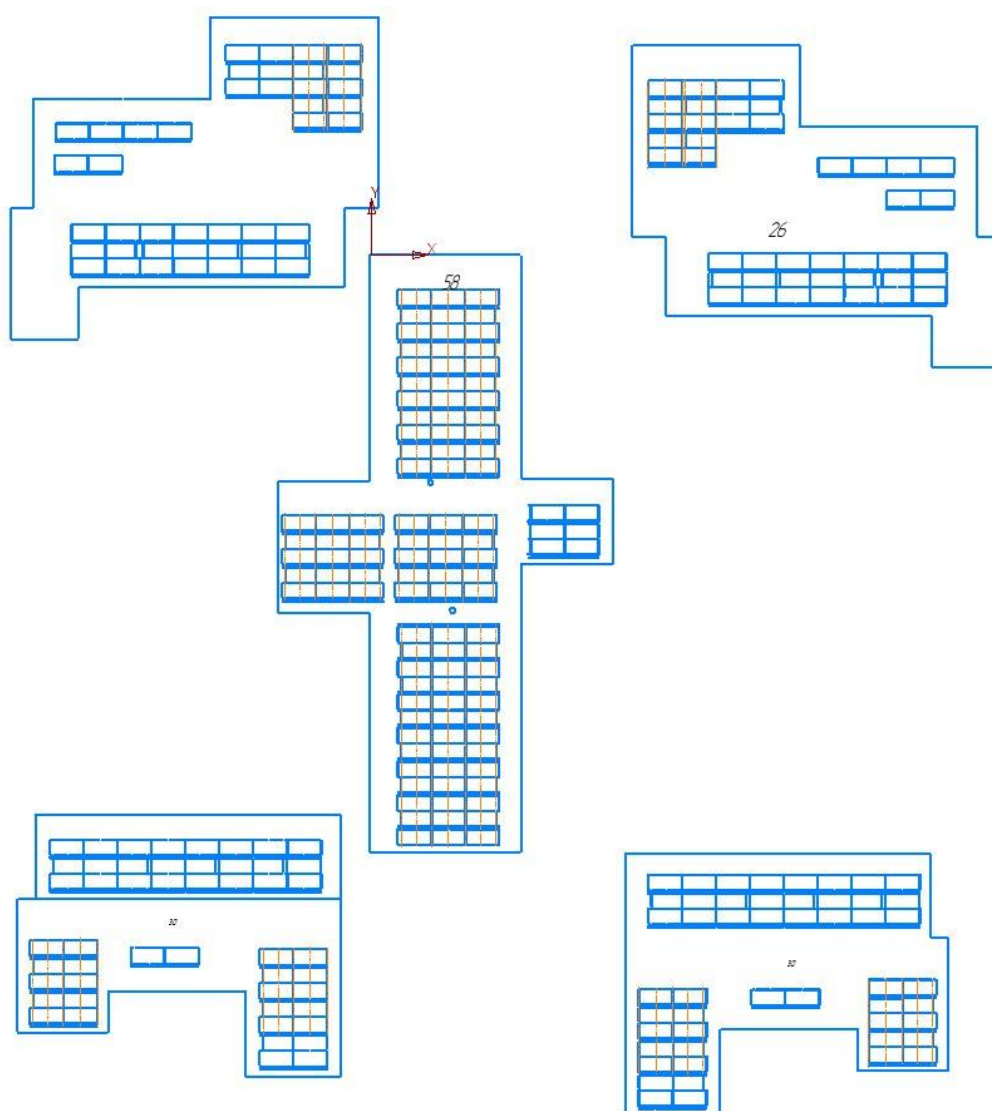


Рисунок 2.5 – Схема розкладки фотомодулів після модернізації

Оптимізація орієнтації та кута нахилу може бути можливою під час модернізації. У початкових установках, використовуватиметься кріплення на даху з естетичних міркувань або неоптимальний нахил через обмеження кріпильної системи. Сучасні регульовані системи кріплень забезпечують оптимальні кути нахилу, що максимізують річну генерацію — зазвичай наближаючись до широти місця розташування для максимальної річної потужності, або більш крутий нахил для сприяння зимовій генерації або самоочищенню завдяки більш крутому стоку дощової води. Коригування орієнтації на південь (у північній півкулі) або трохи на захід для отримання цінної енергії в другій половині дня може виправдати модифікацію системи кріплення. Для даного об'єкту буде запропоновано матеріали (табл. 2.4) та компоненти системи кріплень, наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.4 – Матеріали необхідні для монтажу фотомодулів

Найменування	Од.	К-сть	Вага за од. [кг]	Вага загальна [кг]
Підкладка композитна 60х60х4мм М8	шт	700	0,00	0,00
Баластний блок 200х200х60 в комплекті	шт	1257	7,15	8987,55
Сполучення для баластної системи 20 градусів у зборі Zn	шт	120	0,00	0,00
Прижим середній T-SP у зборі	шт	258	0,00	0,00
Базовий Трикутник 15 градусів Zn	шт	419	4,80	2011,20
Прижим торцевий SP-35 у зборі	шт	404	0,00	0,00

Розширення масиву може сприяти модернізації. Якщо раніше простір даху не використовувався через затінення, яке згодом було усунуто (дерева видалено, споруди перенесено), або якщо модулі з вищою ефективністю звільняють потужність в межах меж взаємозв'язку, додавання модулів збільшує загальну потужність системи. Модернізація електричної інфраструктури для модернізації може забезпечити розширення з мінімальними додатковими витратами

Таблиця 2.5 – Компоненти системи кріплень

Назва вузла	К- сть елеме нтів	Назва елемету	Од.
Комплект кріплення ряду 2ФЕМ	5	Базовий Трикутник 15 градусів Zn	шт
	6	Прижим торцевий SP-35 у зборі	шт
	2	Прижим середній T-SP у зборі	шт
	15	Баластний блок 200х200х60 в комплекті	шт
Комплект кріплення ряду 3ФЕМ	7	Базовий Трикутник 15 градусів Zn	шт
	7	Прижим торцевий SP-35 у зборі	шт
	4	Прижим середній T-SP у зборі	шт
	21	Баластний блок 200х200х60 в комплекті	шт
Комплект кріплення ряду 4ФЕМ	9	Базовий Трикутник 15 градусів Zn	шт
	8	Прижим торцевий SP-35 у зборі	шт
	6	Прижим середній T-SP у зборі	шт
	27	Баластний блок 200х200х60 в комплекті	шт
Комплект кріплення ряду 7ФЕМ	15	Базовий Трикутник 15 градусів Zn	шт
	11	Прижим торцевий SP-35 у зборі	шт
	12	Прижим середній T-SP у зборі	шт
	45	Баластний блок 200х200х60 в комплекті	шт
Комплект кріплення ряду 8ФЕМ	16	Базовий Трикутник 15 градусів Zn	шт
	12	Прижим торцевий SP-35 у зборі	шт
	14	Прижим середній T-SP у зборі	шт
	48	Баластний блок 200х200х60 в комплекті	шт
Профіль сполучення ряду	12 0	Сполучення для баластної системи 20 градусів у зборі Zn	шт
Підкладка	70 0	Підкладка композитна 60х60х4мм M8	шт

2.3.1 Розрахунок снігових навантажень

Механічна інтеграція нових модулів з існуючими монтажними конструкціями вимагає ретельного оцінювання. Монтажні рейки, затискачі та системи заземлення можуть потребувати модернізації для пристосування до різних профілів або ваги рамок модулів. Модулі, як правило, стають важчими в міру збільшення їх розмірів — модуль потужністю 550 Вт важить приблизно 28-32 кг, тоді як модуль потужністю 230 Вт 2010 року важив 18-20 кг.

Перевірка структурного навантаження гарантує, що дах витримує вагу нового обладнання. Розрахунок снігових та вітрових навантажень виконано відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування.

Характеристичне значення ваги PV модулів Longi Solar LR5-72HPH-550M визначається технічними характеристиками PV модулів.

Вага PV модуля Longi Solar LR5-72HPH-550M – 27,2 кг.

Характеристичне значення ваги системи кріплення визначається технічними характеристиками системи кріплення .

Вага системи кріплення на один PV модуль – 10,9 кг.

Вага баластних блоків на один PV модуль – 48,8 кг

Експлуатаційне розрахункове значення снігового навантаження приймається таким, що дорівнює характеристичному значенню снігового навантаження $S_0=1530$ Па.

Граничне розрахункове значення ваги PV модулів Longi Solar LR5-72HPH-550M з урахуванням коефіцієнта - γ_{fm} – коефіцієнт надійності за граничним значенням снігового навантаженням – 0,83. дорівнює – 25,9 кг.

Граничне розрахункове значення ваги системи кріплення на один PV модуль з урахуванням коефіцієнта надійності за граничним навантаженням – 0,83 для металевих конструкцій - 2,5 кг.

2.3.2. Розрахунок вітрових навантажень

Відповідно до ДБН В.1.2-2:2006 об'єкт об'єкт автономна сонячна електростанція включаючи акумуляторні батареї в межах 1 району характеристичного значення вітрового тиску.

Вихідні дані:

Характеристичне значення вітрового тиску $W_0 = 380$ Па;

Аеродинамічний коефіцієнт $C_{aer} = 0,1$;

Коефіцієнт висоти споруди $C_h = 2,5$;

Коефіцієнт географічної висоти $C_{alt} = 1$;

Коефіцієнт рельєфу $C_{rel} = 1$;

Коефіцієнт напрямку $C_{dir} = 1$;

Коефіцієнт динамічності $C_d = 0,9$;

Коефіцієнт γ_{fm} надійності за граничним розрахунковим значенням вітрового навантаження $= 0,82$;

Коефіцієнт γ_{fe} надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням вітрового навантаження $= 0,21$;

Граничне розрахункове значення вітрового навантаження –

$$W_m = \gamma_{fm} W_0 C,$$

де γ_{fm} - коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням вітрового навантаження, визначений;

W_0 – характеристичне значення вітрового тиску 380;

C – коефіцієнт, визначений як $C = C_{aer} C_h C_{alt} C_{rel} C_{dir} C_d$

$$W_m = 0.82 * 380 * 0.1 * 2.5 * 1 * 1 * 1 * 0.9 = 70,1 \text{ Па}$$

Експлуатаційне розрахункове значення вітрового навантаження –

$$W_e = \gamma_{fe} W_0 C = 0.21 * 380 * 0.1 * 2.5 * 1 * 1 * 1 * 0.9 = 18.0 \text{ Па}$$

Несуча спроможність вітрового навантаження системи кріплення відповідно до технічних характеристик - до 25 м/с або 404 Па.

Несуча спроможність системи кріплення задовольняє вихідним даним розрахунку.

Інженерний огляд підтверджує, що номінальні значення вітрового та снігового навантаження відповідають місцевим нормам з оновленим обладнанням. З огляду на сейсмічні особливості відповідних регіонів, монтажна система повинна відповідати чинним стандартам. Оцінка стану даху може виявити пошкодження, які потребують ремонту перед встановленням

модулів — виявлення протікання даху після встановлення модулів виявляється набагато дорожчим, ніж профілактичний ремонт.

2.3.3 Електрична інтеграція оновленого електрообладнання

Потрібно модернізувати ємність розподільної коробки, оскільки нова сонячна станція потужністю 100 кВт буде складатись з двох паралельно підключених 50 кВт інверторів. Важливим є правильне підключення обладнання, щоб запобігти перегоранню та руйнуванню структури обладнання, що у свою чергу зберігає цілісність система і коректну роботу як електроенергуючого обладнання, так і систем захисту. Схема трифазного паралельного з'єднання наведена в Додатку 2. Модулі з більш високим струмом вимагають відповідних пристроїв захисту від перевантаження, клем та шин. Потрібні встановити нові роз'єднувачі, якщо існуюче обладнання не може впоратися зі збільшеною потужністю системи.

2.4 Розрахунок системи накопичення енергії (BESS) та підбір обладнання

Проаналізувавши добовий профіль навантаження підприємства та генерації сонячної електростанції, можна зробити висновок, що близько 65–70% виробленої сонячної енергії (приблизно 68 000 – 73 500 кВт·год на рік) безпосередньо покриває споживання об'єкта в ті часові проміжки, коли генерація та навантаження мають одночасно підвищені значення. На графіку це відповідає ранковим і передобіднім годинам (7:00–11:00), коли потужність генерації СЕС зростає до 30–40 кВт, а споживання підприємства перебуває у межах 18–27 кВт, що забезпечує майже повне миттєве самозабезпечення.

Решта 30–35% річної генерації (орієнтовно 32 000 – 38 500 кВт·год) припадає на періоди, коли виробіток СЕС перевищує фактичне споживання підприємства. Це переважно обідній часовий інтервал (11:00–14:00), коли потужність генерації досягає максимуму (≈ 38 –40 кВт), тоді як споживання знижується до 16–22 кВт через часткову зупинку обладнання під час технічних

перерв. Подібна ситуація спостерігається також у вечірні години після 15:00, коли генерація зменшується повільніше, ніж споживання.

На цій СЕС буде встановлено систему зберігання енергії Deye на літій-залізо-фосфатних акумуляторах потужністю 120 кВт·год, а саме: два кластера по 60 кВт·год (рис. 2,6), адже вона найкраще підходить для даного підприємства. Відповідно до своїх технічних характеристик (короткий опис наведено в таблиці 2.5, детальні характеристики в додатку 4) дана система накопичення значно покращує економіку власного споживання та незалежність від енергомережі завдяки стратегічному тимчасовому перенесенню навантаження.



Рисунок 2.6 – Кластер високовольної системи

Deye BOS-G PRO — це передова система накопичення енергії на основі літійово-залізних фосфатних (LiFePO_4) акумуляторів високої напруги, спеціально розроблена для інтеграції з сучасними гібридними та автономними

сонячними установками. Ці модульні акумуляторні системи, що працюють при номінальній напрузі від 192 В до 768 В залежно від конфігурації, призначені для надійного та тривалого накопичення енергії для житлових, комерційних та промислових застосувань, що вимагають значної резервної потужності та складних можливостей управління енергією [28].

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики акумуляторів

Технічна характеристика	Значення
Тип батареї	Літій-залізо-фосфатна (LiFePO ₄) акумуляторна система
Модульна платформа	19" rack-монтаж, легка установка та обслуговування
Номінальна енергія модуля	≈ 5,12 кВт·год
Номінальна напруга модуля	≈ 51,2 В DC
Ємність батареї	100 А·год
Хімія елементів	LiFePO ₄ — підвищена безпека, тривалий ресурс
Інтелектуальний BMS	Є — захист від перезаряду, перерозряду, перевантаження, температурний захист, балансування елементів
Робоча температура (заряд)	0 °C ... +55 °C
Робоча температура (розряд)	-20 °C ... +55 °C
Циклічний ресурс	≥ 6000 циклів (до 90 % EOL)
Глибина розряду (DOD)	До 90 % (часті експлуатаційні режими)
Ступінь захисту корпусу	IP20 (внутрішній монтаж)
Комунікації	CAN2.0 / RS485 для інтеграції з інверторами/системою моніторингу
Гарантія	10 років стандартно
Масштабованість	Можлива паралельна робота кількох модулів для збільшення ємності та потужності
Сертифікації	UN38.3, CE, EMC, IEC62040, VDE, CEC (гарантія відповідності стандартам)

Акумуляторна система BOS-G PRO (табл. 2.6) використовує модульну конструкцію, що складається з окремих акумуляторних модулів, які зазвичай мають номінальну ємність 5,12 кВт·год і можуть комбінуватися для створення систем ємністю від 25 кВт·год до понад 50 кВт·год в одній установці. Кожен модуль містить високоякісні LiFePO₄-елементи, відомі своєю винятковою

термічною стабільністю, характеристиками безпеки та подовженим циклом експлуатації, що перевищує 6000 циклів при 90% глибині розряду. Інтегрована система управління батареями (BMS) забезпечує комплексний моніторинг на рівні елементів, активне балансування та багаторівневий захист, включаючи захист від перенапруги, недонапруги, перевантаження, перегріву та короткого замикання.

Акумулятори BOS-G PRO спеціально рекомендуються для інверторів Deye завдяки безперебійній сумісності комунікацій через власні протоколи CAN-шини.

Ця вбудована інтеграція дозволяє інвертору та акумулятору обмінюватися оперативними даними в режимі реального часу, включаючи стан заряду, напругу елементів, температуру та стан системи, що забезпечує оптимізовані алгоритми заряджання, які максимізують термін служби та продуктивність акумулятора. Інвертори Deye автоматично розпізнають акумулятори BOS-G PRO і налаштовують відповідні параметри напруги, швидкість заряджання та пороги захисту без ручного програмування.

Висновки до розділу 2

Мною всебічно розглянуто методологічний підхід до модернізації існуючої сонячної електростанції потужністю 30 кВт до гібридної системи потужністю 100 кВт з інтегрованим акумуляторним сховищем. Аналіз технічного стану показав, що природне зношення модулів та застаріла технологія інверторів значно знизили продуктивність системи, що є чітким обґрунтуванням для проведення комплексної модернізації, а не часткового оновлення.

Заміна застарілих інверторів на сучасні вискоефективні пристрої з вдосконаленими алгоритмами MPPT забезпечує миттєве підвищення продуктивності, а розширення потужності з 30 кВт до 100 кВт за рахунок встановлення сучасних фотоелектричних модулів збільшує річне виробництво енергії приблизно на 80 000 кВт·год. Розрахунки конструкції на снігове та вітрове навантаження підтверджують, що правильне проектування забезпечує

безпеку та довговічність системи в місцевих кліматичних умовах, захищаючи значні капіталовкладення.

Інтеграція акумуляторної батареї ємністю 120 кВт·год перетворює установку з простої системи, підключеної до електромережі, на складну гібридну платформу, здатну забезпечувати резервне електропостачання, операції з вирівнювання пікових навантажень та вдосконалені стратегії самоспоживання. Вибір високовольтних літій-залізних фосфатних акумуляторів Deye BOS-G PRO в поєднанні з сумісними інверторами Deye забезпечує оптимальну продуктивність системи, інтеграцію комунікацій та подовжений термін експлуатації, створюючи сучасну енергетичну інфраструктуру, що відповідає усім технічним вимогам.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ СОНЯЧНОЇ СТАНЦІЇ

3.1 Розрахунок прогнозованої генерації після модернізації

Гібридна сонячна електростанція потужністю 100 кВт є сучасним енергетичним комплексом, оснащеним високоефективними фотоелектричними модулями, інверторами нового покоління та системами акумулювання електроенергії (тал. 3.2). У перший рік експлуатації її питома генерація становить близько 105 000 кВт·год/кВт·рік, що свідчить про високий рівень технологічної досконалості системи. Наявність акумуляторів дозволяє не лише накопичувати надлишкову електроенергію, але й забезпечувати резервне живлення споживачів у разі аварійних відключень мережі, а також реалізовувати режими peak-shaving та підвищеного самоспоживання.

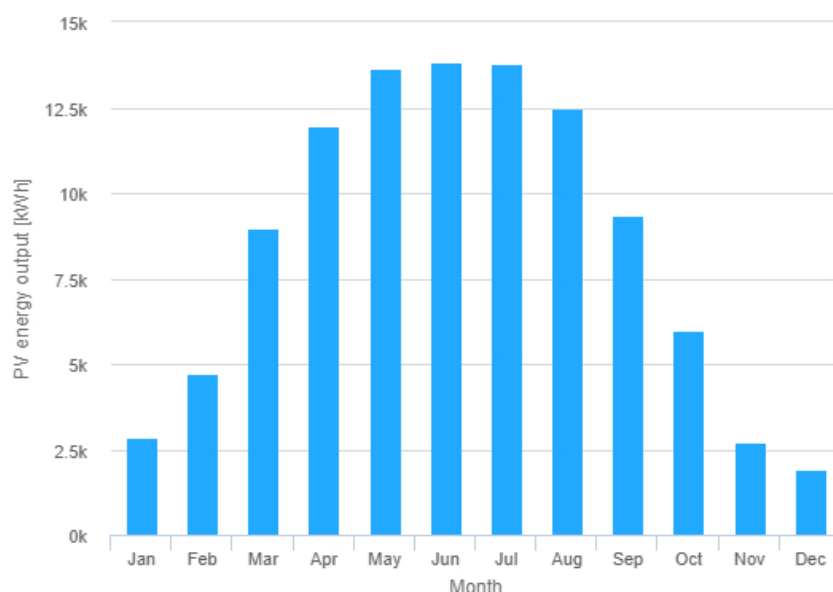


Рисунок 3.1 – Прогноз вирубівку сонячної електроенергії

Модернізована система потужністю 100 кВт буде генерувати значно більше електроенергії, ніж зношена установка потужністю 30 кВт, яка в даний час виробляє лише 25 000-27 000 кВт·год на рік через п'ятнадцятирічне зниження продуктивності. Нова система прогнозує виробництво електроенергії в перший рік на рівні 102 000-115 000 кВт·год на рік, що на 400-425% більше,

ніж поточна погіршена продуктивність. Детальніше наведено місячний виробіток енергії від фотоелектричної системи на діаграмі на рисунку 3.1.

Річне очікуване виробництво фотоелектричної енергії: 102 174,51 кВт*год, що складається з суми генерацій електроенергії кожного місяця (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Річне очікуване виробництво фотоелектричної енергії

Місяць	Продуктивність станції, кВт*год	Середньомісячна сума інсоляції на квадратний метр, отримана PV модулями даної системи [кВт*год/м ²].	Стандартне відхилення місячного виробництва електроенергії через зміну років [кВт*год].
Січень	2865.8	34.4	344.8
Лютий	4699.2	55.4	647.9
Березень	8952.8	107.3	1088.0
Квітень	11941.6	151.6	1407.2
Травень	13657.0	179.5	1071.6
Червень	13847.1	185.0	641.8
Липень	13771.3	184.8	748.5
Серпень	12482.0	167.4	801.7
Вересень	9366.1	120.3	1292.8
Жовтень	5978.6	74.6	1149.5
Листопад	2706.7	33.8	464.6
Грудень	1906.4	24.2	399.6

Сучасні монокристалічні модулі PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) потужністю 500-550 Вт кожен досягають ефективності перетворення 21-22% порівняно з 14-16% у полікристалічних модулях об'єкта 2010 року. Система номінальною потужністю 100 кВт складається з 182 модулів. Ці вдосконалені модулі містять технологію напіврозрізаних комірок, що зменшує резистивні втрати, конструкцію з декількома шинами (12 шин проти 3-5 у старих модулях), що покращує збір струму, антирефлекторні покриття, що збільшують поглинання світла, та покращені температурні коефіцієнти (-0,35 %/°C проти -0,45 %/°C), що забезпечують кращу продуктивність під час [29].

Довгострокове погіршення відповідає специфікаціям виробника, згідно з якими сучасні преміум-модулі мають лінійне погіршення, зберігаючи 92% потужності після 25 років. Щорічне погіршення на 0,5% означає, що виробництво на 10-й рік досягає 97 000-109 000 кВт·год, а на 25-й рік — приблизно 90 000-100 000 кВт·год, що все ще значно перевищує поточну продуктивність системи протягом усього періоду аналізу. Протягом усього 25-річного терміну експлуатації системи сукупна генерація становить приблизно 2 550 000–2 875 000 кВт·год, порівняно з 700 000–720 000 кВт·год, які б виробила застаріла система за той самий період, якби її підтримували (оптимістично припускаючи, що не буде катастрофічних збоїв), що становить на 360–400 % більше енергії, виробленої за весь термін експлуатації.

3.2 Економічна оцінка модернізації енергетичних систем

Методологія економічної оцінки використовує комплексну систему аналізу витрат і вигод протягом усього життєвого циклу, що охоплює 25-річний очікуваний термін експлуатації системи. Цей ретельний підхід оцінює заміну застарілої установки потужністю 30 кВт 2010 року випуску на сучасну систему сонячної енергії та акумуляції потужністю 100 кВт, враховуючи всі капітальні витрати, експлуатаційні витрати, виробництво енергії, економію та фінансові стимули, одночасно надаючи особам, що приймають рішення, чіткі фінансові показники.

Оцінка капітальних витрат включає поточні ринкові ціни, які дещо нижчі за середні ставки, виходячи з ринкових даних за 2024-2025 роки (табл. 3.2). Фотоелектричні модулі коштують приблизно 0,17 долара за ват (17 000 доларів за 100 кВт преміальних монокристалічних панелей PERC), інвертори з гібридною функцією зберігання – 0,12 долара/ват (12 000 доларів за два блоки потужністю 50 кВт), система акумуляування енергії в батареях (120 кВт·год літій-залізний фосфат) – 270 доларів за кВт·год (27 000 доларів разом із системами управління), компоненти балансу системи, включаючи монтаж, електропроводку та електричне обладнання, а також професійні монтажні роботи. Загальна вартість системи до застосування 91 150 дол.

Таблиця 3.2 – Оцінка капіталовкладень для модернізації СЕС

№ п/п	Найменування	Од. виміру	Кількість	Вартість, дол
1.	Влаштування гібридної сонячної електростанції 100 кВт включаючи акумуляторні батареї номінальної потужністю 120 кВт на покрівлі існуючої будівлі з доставкою та монтажем, та демонтаж існуючої СЕС 30 кВт	к-т	1	11 500
1.1.	Сонячна панель Longi Solar LR 5 72HPH 550B (LR5-72HPH-550M)	шт.	182	17 000
1.2.	Гібридний інвертор DEYE 50kva with wifi. 230V THREE PHASE, CE VDE (SUN -50K-SG01HP3-EU-BM-4)	шт.	2	12 000
1.3.	Акумулятор літій-іонний високовольтний Deye BOS-G Pro	шт.	24	24 000
1.4.	Блок управління Deye BOS-G Pro PDU	шт.	2	1500
1.5.	Баластна система кріплень ФЕМ	шт.	182	18 200
1.6.	Сонячний кабель панелей 6мм2 KBE SOLAR H1Z2Z2-K	м.пог.	1500	1 950
1.7.	Шафа підлогова 3U-HRACK	шт.	2	1 000
1.8.	Додаткові витратні матеріали	компл.	1	4 000
			Всього:	91 150

Порівняння вартості сонячної електростанції потужністю 30 кВт, підключеної до електромережі, та гібридної сонячної електростанції потужністю 100 кВт з системою зберігання енергії показує значні відмінності як у структурі витрат, так і в функціональних можливостях систем.

Загальна вартість сонячної електростанції потужністю 30 кВт (табл. 3.3), підключеної до електромережі, становить приблизно 89 500 доларів США. Основними складовими витрат у цій конфігурації є фотоелектричні модулі та інвертор, підключений до електромережі. Система не передбачає накопичення енергії і працює виключно в режимі генерації, при цьому енергія подається в мережу або споживається об'єктом. Станція такого типу зазвичай має простішу архітектуру і нижчі початкові капітальні витрати. Однак слід зазначити, що резервне живлення і можливості оптимізації навантаження не передбачені.

Таблиця 3.3 – Орієнтовні затрати на побудову першої СЕС

Обладнання	Кількість	Орієнтовна вартість, USD
Фотомодуль Trina Solar TSM-DC01A Comax 200 Wp	150 шт.	52 000
Мережевий інвертор Growatt 30000UE	1 шт.	9 000
Система кріплень для даху	Комплект	12 000
DC-комбайнер (string box)	1–2 шт.	500
Роз'єднувач DC	1 шт.	150
DC кабель PV 6 мм ²	400–500 м	600 – 750
АС кабель 5×10–16 мм ²	20–40 м	150 – 300
Автоматичний вимикач АС 3-фазний	1 шт.	120
SPD DC – захист від перенапруг	1 комплект	500
SPD АС – захист від перенапруг	1 комплект	180
Система заземлення	1 комплект	300
Лічильник двонапрямний	1 шт.	400
Комунікаційний модуль Growatt (WiFi/LAN/логер)	1 шт.	150
Щити АС/DC та обліку	2–3 шт.	450
Витратні матеріали	Комплект	1 800
Електро-монтажні роботи	К-ть. 1	11 000
	Всього:	89 500

Вартість гібридної сонячної електростанції потужністю 100 кВт з акумуляторами, що забезпечують загальну ємність 120 кВт·год, становить 91 150 доларів США. Це лише трохи вище, ніж вартість меншої станції, підключеної до мережі. Гібридна система включає в себе найсучасніші фотоелектричні модулі з підвищеною вихідною потужністю, два гібридні інвертори, високовольтну акумуляторну систему, блоки управління, а також витрати на виведення з експлуатації існуючої сонячної електростанції та встановлення нового комплексу.

Отже, при відносно схожих капітальних витратах гібридна сонячна електростанція потужністю 100 кВт забезпечує значно вищу встановлену потужність, можливість зберігання електроенергії, резервне живлення та підвищену гнучкість енергосистеми об'єкта. Це свідчить про значно вищу технологічну та економічну доцільність гібридного рішення в довгостроковій перспективі.

Порівняння двох станцій (Табл. 3.4) показує, що, незважаючи на стабільну роботу мережевої СЕС після 15 років експлуатації, її техніко-

економічні показники суттєво поступаються сучасній гібридній станції. Це демонструє доцільність модернізації застарілих сонячних електростанцій шляхом заміни інверторів, реповерінгу фотоелектричних модулів та можливого доукомплектування системами накопичення енергії. Водночас гібридні СЕС відіграють важливу роль у підвищенні енергонезалежності об'єктів та забезпеченні стабільності електропостачання в умовах нестабільної роботи енергосистеми.

Таблиця 3.4 – Порівняння ефективності існуючої та оновленої СЕС

Параметр	Мережева СЕС 30 кВт (15 років експлуатації)	Гібридна СЕС 100 кВт (1-й рік експлуатації)
Тип станції	Мережева (on-grid), без акумуляції	Гібридна (on-grid + АКБ, резервне живлення)
Встановлена потужність, кВт	30	100
Вік станції	≈ 15 років	0–1 рік
Річна генерація, кВт·год/рік	≈ 23 600	≈ 102 500
Питома генерація, кВт·год/кВт·рік	≈ 787	≈ 1 025
Відносний рівень генерації	≈ 77 % від показника нової СЕС	100 % (еталон)
Стан обладнання	Ймовірна деградація модулів, застарілий інвертор	Нове обладнання, високий ККД інверторів
Наявність резервування	Відсутнє	Наявне за рахунок АКБ
Гнучкість роботи	Лише відпуск у мережу	Самоспоживання, peak- shaving, backup
Перспектива модернізації	Потребує реповерінгу та заміни інвертора	Актуальна технологія, модернізація у майбутньому

Розрахунок фінансових показників включає простий період окупності (інвестиції, поділені на щорічну економію), чисту теперішню вартість, що відображає поточну вартість капіталу, внутрішню норму прибутковості в порівнянні з корпоративними пороговими ставками, а також вирівнює вартість енергії, порівнюючи витрати на виробництво сонячної енергії з електроенергією з мережі протягом терміну експлуатації системи.

3.3. Оцінка впливу модернізації на енергоефективність промислового об'єкта

Енергоефективність об'єкта в цілому значно покращується завдяки модернізації сонячної енергетики, що можна виміряти за допомогою декількох міжнародно визнаних ключових показників ефективності, які забезпечують комплексну оцінку підвищення енергопродуктивності. Ці показники дозволяють проводити порівняльний аналіз з галузевими стандартами, підтримують вимоги до корпоративної звітності щодо сталого розвитку та кількісно оцінюють підвищення конкурентоспроможності за рахунок зниження енергоємності.

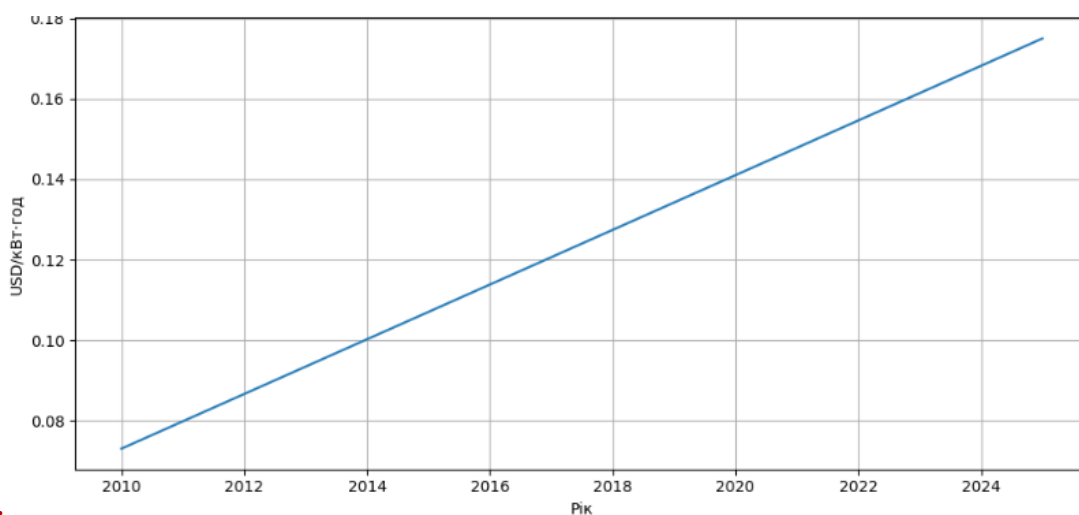


Рисунок 3.2. Зростання вартості електроенергії для підприємств за період з 2010 по 2025 рік

Частка відновлюваної енергії — відсоток від загального енергоспоживання об'єкта, що забезпечується відновлюваними джерелами — різко зростає з поточних 7,1-7,8% (32 000–35 000 кВт·год від застарілої існуючої системи, поділені на 450 000 кВт·год загального споживання) до 47,6–55,2 % після модернізації (214 250–248 500 кВт·год споживання сонячної енергії, поділені на 450 000 кВт·год загальної потреби об'єкта). Це ставить об'єкт у вигідне становище щодо все більш суворих корпоративних зобов'язань у сфері відновлюваної енергії, включаючи зобов'язання RE100, спрямовані на 100% відновлювану електроенергію, вимоги до стійкості ланцюга поставок від

великих роздрібних торговців і виробників, які вимагають від постачальників переходу на відновлювану енергію, а також сертифікати екологічного будівництва (LEED, BREEAM), що включають критерії відновлюваної енергії. Показник частки відновлюваної енергії також підтримує екологічні декларації продуктів і розрахунки вуглецевого сліду для промислових товарів, що потенційно може забезпечити преміальну ціну на екологічно свідомих ринках.

Модернізація сонячної енергетики супроводжується поліпшенням якості електроенергії, що забезпечує підвищення ефективності в системах розподілу та використання електроенергії на об'єкті. Сучасні інвертори з передовою силовою електронікою та складними алгоритмами управління підтримують коефіцієнт потужності, близький до одиниці (0,99-1,0 безперервно), порівняно з поточним загальним коефіцієнтом потужності об'єкта 0,85-0,90, що визначається індуктивними навантаженнями від двигунів, трансформаторів та флуоресцентного освітлення без відповідної корекції. Покращений коефіцієнт потужності зменшує циркуляцію реактивної потужності через електропроводку та трансформатори об'єкта, зменшуючи резистивні втрати (втрати I^2R зменшуються пропорційно до зменшення струму від покращеного коефіцієнта потужності) приблизно на 8-12% у розподільних ланцюгах. Крім того, штрафи за коефіцієнт потужності, що нараховуються, коли щомісячний коефіцієнт потужності падає нижче 0,95 (наразі це коштує 400-650 доларів на місяць, 4800-7800 доларів на рік), повністю скасовуються, що створює пряму економію витрат, крім зменшення споживання енергії.

3.4 Розрахунок економії коштів та окупності інвестицій

Модернізація сонячної енергетичної системи з потужністю від 30 кВт до 100 кВт у поєднанні з установкою акумуляторної батареї ємністю 120 кВт·год є стратегічною інвестицією в енергетичну інфраструктуру та операційну стійкість медичного закладу. Це комплексне оновлення забезпечує суттєве поліпшення потужності генерації енергії, можливостей зберігання та загальної

ефективності системи, що безпосередньо перетворюється на вимірювані фінансові вигоди.

Таблиця 3.5 відображає результати оцінки економічної ефективності мережевої сонячної електростанції потужністю 30 кВт за період експлуатації 15 років з урахуванням деградації генерації та структури використання виробленої електроенергії. Середньорічний обсяг генерації становить 28 750 кВт·год, з яких 70% використовується безпосередньо для покриття власних потреб підприємства, а решта 30% реалізується в електричну мережу за “зеленим” тарифом.

Таблиця 3.5. Оцінка окупності існуючих СЕС потужністю 30 кВт

Показник	Значення
Термін експлуатації	15 років
Середня генерація за рік	28 750 кВт·год/рік
Самоспоживання (70%)	20 125 кВт·год/рік
Продаж (30%)	28 750 кВт·год/рік
Середня ціна електроенергії для підприємства	0.125 USD/кВт·год
Середня ціна “зеленого” тарифу	0.40 USD/кВт·год
Ефект від самоспоживання за рік	2 515 USD/рік
Дохід від продажу за рік	11 500 USD/рік
Сумарний ефект за рік	8 985 USD/рік
Сумарний ефект за 15 років	134 775 USD
CAPEX станції (з твоєї таблиці)	89 500 USD
Кратність окупності	1.5

Економічний ефект від самоспоживання формується за рахунок заміщення електроенергії, що закуповується з мережі за середньою ціною 0,125 USD/кВт·год, і становить близько 2 515 USD на рік. Додатковий дохід від продажу надлишкової електроенергії за “зеленим” тарифом із середньою ставкою 0,4 USD/кВт·год забезпечує приблизно 1 500 USD на рік. Таким чином, сумарний щорічний економічний ефект від експлуатації СЕС становить близько 8 985 USD.

За весь розрахунковий період експлуатації загальний накопичений економічний ефект досягає 134 775 USD, що практично відповідає початковим капітальним витратам на будівництво станції у розмірі 89 500 USD. Отримане значення коефіцієнта окупності на рівні 1,5 свідчить про повну окупність

проекту, однак з формування часткового чистого прибутку, що підтверджує доцільність модернізації системи або перегляду моделі використання виробленої електроенергії для підвищення економічної ефективності.

Розширена сонячна установка потужністю 100 кВт генерує приблизно 100 000–105 000 кВт·год на рік, залежно від географічного розташування, сезонних коливань та погодних умов. Це є значним збільшенням порівняно з попередньою системою потужністю 30 кВт, яка виробляла лише 28 000–31 000 кВт·год на рік. Чисте збільшення на 72 000–75 000 кВт·год у річному виробництві чистої енергії безпосередньо зменшує залежність об'єкта від електроенергії, що постачається з мережі, та забезпечує значну економію коштів.

Таблиця 3.6. Оцінка окупності модернізованої СЕС потужністю 100 кВт

Показник	Значення
Період експлуатації	2026–2051 (25 років)
Генерація 1-го року (2026)	105 000 кВт·год
Генерація 25-го року (2051)	98 000 кВт·год
Середня генерація за рік	101 500 кВт·год/рік
Самоспоживання (90%)	91 350 кВт·год/рік
Продаж у мережу (10%)	10 150 кВт·год/рік
Ціна є/є для підприємства	0.23 USD/кВт·год
Ефект від самоспоживання за рік	23 345 USD/рік
Сумарний ефект за рік	23 345 USD/рік
Сумарний ефект за 25 років	583 625 USD
CAPEX станції	91 150 USD
Скільки разів окупилась	≈ 6,4

Таблиця 3.6 відображає результати оцінки економічної ефективності гібридної сонячної електростанції за період експлуатації 2026–2051 років тривалістю 25 років. За розрахунковими даними, річний обсяг виробництва електроенергії зменшується з 105 000 кВт·год у першому році експлуатації до 98 000 кВт·год у двадцять п'ятому році, що відповідає поступовій деградації фотоелектричних модулів. Середньорічна генерація за весь період становить 101 500 кВт·год.

Особливістю розглянутої конфігурації є високий рівень власного використання. Завдяки цьому основний економічний ефект формується не за

рахунок продажу електроенергії в мережу, а шляхом заміщення закупівлі електроенергії з мережі за ціною 0,23 USD/кВт·год. У результаті щорічний ефект від самоспоживання становить 23 345 USD, що одночасно є сумарним річним економічним ефектом проекту.

За весь період експлуатації накопичений економічний ефект досягає 583 625 USD, що суттєво перевищує початкові капітальні витрати на будівництво станції у розмірі 91 150 USD. Розрахований коефіцієнт окупності становить приблизно 6,4, що означає, що за 25 років експлуатації інвестиції у гібридну сонячну електростанцію повертаються більш ніж шість разів.

Отримані результати свідчать про високу економічну доцільність впровадження гібридної СЕС із максимальною орієнтацією на власне споживання електроенергії, особливо в умовах зростання тарифів на електроенергію для підприємств та довгострокового періоду експлуатації обладнання.

Загальний обсяг капіталовкладень у проект модернізації становить від 91 500 доларів, включаючи закупівлю обладнання (сонячні панелі, інвертори, акумуляторні системи), монтажні роботи, кріпильні конструкції, електричну інтеграцію та системи моніторингу. Виходячи з річної економії, простий термін окупності становить приблизно 4 роки. Однак цей показник не враховує кілька важливих факторів, які значно покращують інвестиційний профіль.

Державні субсидії, що покривають 20-30% витрат проекту, можуть скоротити термін окупності до менше ніж 4 років, що робить цю інвестицію дуже привабливою як з фінансової, так і зі стратегічної точки зору, одночасно підвищуючи енергетичну безпеку та оперативну стійкість.

3.5 Технічне завдання проекту

Модернізація автономної сонячної електростанції включаючи акумуляторні батареї, підвищення номінальної потужності до 100 кВт на покрівлі існуючої будівлі з доставкою та монтажем.

Площа покриття покрівлі будівлі обрана із розрахунку необхідності розмістити фотоелектричні генератори (ФЕГ) загальною установленою потужністю електрогенеруючої установки 100 кВт, кабельних ліній постійного

струму напругою до 1 кВ, інверторного обладнання (інверторів), кабелю змінного струму напругою 1 кВ котрі підключити до існуючого щиту замовника, через щит захисту. Електрогенеруюча установка матиме розподілене розташування фотоелектричних модулів. Для монтажу металоконструкції для кріплення ФЕМ до покрівлі, розроблено систему кріплення панелей, трас PV кабелів до інвертору, котра не пошкоджує покрівлі будівлі. ФЕМ розміщуються із дотриманням критерію оптимального заповнення площі покрівлі. Нахил ФЕМ відносно горизонту покрівлі складає 15°, ФЕМ орієнтуються в південному напрямку згідно фізичної орієнтації даху будівлі.

Планується розмістити всього 182 фотоелектричних модулів загальною встановленою потужністю 100 кВт. Площа під ФЕМ – 1000 м².

За результатами проведених розрахунків, запропонована дана площа є достатньою для розміщення електрогенеруючої установки вказаної потужності.

У проекті закладено 2 трифазних гібридних інверторів DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM-4, номінальною електричною потужністю 50 кВт кожен та 24 акумуляторних блоків Deye BOS-G Pro (5,1 кВт*год / 51 В) загальною ємністю 120 кВт*год.

3.5.1 Електротехнічне рішення

Електрична частина проекту виконана на підставі технічного завдання замовника.

Точка приєднання: Існуючий щит ВРП будівлі.

Фотоелектричні модулі прийняті Longi Solar LR5-72HPH-550M поєднані в стрінги:

- 6 стрінгів по 17 шт.
- 5 стрінгів по 16 шт.

загалом всього 182 шт. на 2 інвертори DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM-4.

Загалом 182 шт. панелей, та 2 інвертори DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM-4, підключені 2 лініями кабелем ВВГнгд 4х25+ ПВ-3 нгд 16 ж/з мм² (через щит захисту та комутації) до існуючого щиту ВРП будівлі.

Захисне заземлення враховує різні системи заземлення: система TN для розподільчих станцій 0,4 кВ – опір заземлення має бути не більше ніж 4 Ом; система IT для сонячних фотогальванічних панелей.

Для захисту від перенапруги передбачене встановлення обмежувачів перенапруги (ОПН). Для захисту системи сонячних панелей від прямих ударів блискавки використовується контур заземлення, до якого приєднуються всі металеві елементи електрогенеруючої установки.

3.5.2 Розрахунки для побудови головної схеми електричних з'єднань

Нижче наведені розрахунки, виконані для побудови головної схеми електричних з'єднань електрогенеруючої установки на постійному струмі, перевірки потужності інверторів DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM-4.

Дані до креслень розділу (додаток 3), необхідні для виконання розрахунків, зведені у таблиці 3.7 і 3.8.

STC – номінальні характеристики фотоелектричного модуля(Стандартні технічні умови) при температурі фотоелектричного елемента 25^о С, сонячній радіації 1000

Вт/м².

NOCT – робоча характеристика фотоелектричного модуля при температурі повітря 20^о С, сонячна радіації 800 Вт/м²

Таблиця 3.7. Характеристики фотоелектричного модуля Longi Solar LR5-72HPH-550M

Параметр	STC	NOCT
Максимальна потужність (P _{max})	550	411.1
Оптимальна напруга (U _{мрт})	41.95	38.97
Оптимальний струм (I _{мрт})	13.12	10.56
Напруга холостого ходу(U _{хх})	49.8	46.82

Струм короткого замикання (I_{kz})	13.98	11.31
ККД	21.3	
Робоча температура	$-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$	
Максимальна напруга системи	1500V	
Максимальний струм плавкої вставки запобіжника	25A	
Температурний коефіцієнт напруги (t_u)	$-0,265\%/^{\circ}\text{C}$	
Температурний коефіцієнт струму (t_i)	$+0,050\%/^{\circ}\text{C}$	
Номінальна робоча температура елемента	$45 \pm 2^{\circ}\text{C}$	

Таблиця 3.8. Електричні характеристики інвертора DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM-4

Модель	SUN-50K-SG01HP3-EU- BM4
Батарея	
Тип батареї	літій-іонний
Battery Voltage Range (V)	160~800
Макс. Зарядний струм (A)	50+50
Макс. Розрядний струм (A)	50+50
Кількість батарейних входів	2
Стратегія заряджання літій-іонного акумулятора	Самостійна адаптація до BMS
Вхідні дані стрингів PV	
Макс. Вхідна потужність постійного струму (Вт)	65000
Макс. Вхідна напруга постійного струму (В)	1000
Пускова напруга (В)	180
MPPT Range (V)	150-850
Діапазон напруги постійного струму при повному навантаженні (В)	450-850
Номінальна вхідна напруга постійного струму (В)	600
Вхідний струм фотоелектричних модулів (А)	36+36+36+36
Макс. PV ISC (A)	55+55+55+55

Продовження таблиці 3.8

Кількість трекерів MPP	4
Кількість стрингів на трекер MPP	2+2+2+2
Вихідні дані змінного струму	
Номінальна вихідна потужність змінного струму та потужність ДБЖ (Вт)	50000
Макс. Вихідна потужність змінного струму (Вт)	55000
Вихідний струм змінного струму (А)	75.8/72.5
Макс. Вихідний струм змінного струму (А)	83.4/79.7
Макс. Змінний струм (А)	83.3
Макс. Безперервна передача змінного струму (А)	200
Пікова потужність (поза мережею)	в 1,5 рази більше за номінальну потужність, 10 с
Вхід генератора/інтелектуальне навантаження/Струм пари змінного струму (А)	75.8/200/75.8
Діапазон регулювання коефіцієнта потужності	0,8 випереджає 0,8 відстає
Вихідна частота та напруга	50/60 Гц; 3L/N/PE 220/380 В змінного струму, 230/400 В змінного струму
Тип сітки	Три фази
Сумарні гармонічні спотворення (THD)	<3% (номінальної потужності)
Інжекція постійного струму	<0,5% ін
Ефективність	
Макс. Ефективність	97.60%
Євро Ефективність	97.00%
Ефективність MPPT	99.90%
Захист	
Категорія перенапруги	Постійний струм, тип II / змінний струм, тип III
Сертифікати та стандарти	
Регулювання мережі	VDE4105, IEC61727/62116, VDE0126, AS4777.2, CEI 0 21, EN50549-1, G98, G99, C10- 11, UNE217002, NBR16149/NBR16150

Продовження таблиці 3.8

Безпека ЕМС/стандарт	IEC/EN 61000-6-1/2/3/4, IEC/EN 62109-1, IEC/EN 62109-2
Діапазон робочих температур (°C)	-40~60°C, >45°C Зниження номінальних характеристик
Охолодження	Розумне охолодження
Шум (дБ)	≤65 дБ
Зв'язок із BMS	RS485; МОЖЕ
Ступінь захисту	IP65
Стиль встановлення	Настінний
Розміри (ШхВхГ мм)	527×894×294 (без роз'ємів та кронштейнів)
Вага, кг)	80

Вибір кількості фотоелектричних модулів, з'єднаних послідовно (лінійки ФЕМ), виконується за максимальною напругою фотометричного модуля при температурі елемента -30°C та радіації 1000 Вт/м² для даної території.

$$U_{XXmax} = U_{XX} \cdot (1 + (t_{-30} - t_{25}) \cdot k_U)$$

$$U_{XXmax} = 49,8 \cdot [1 + (-30 - 25) \cdot (-0,00265)] = 57,33 \text{ В}$$

Максимальна кількість послідовно з'єднаних модулів N_{umax} :

$$N_{umax} = U_{PVISmax} / U_{XXmax}$$

$$N_{umax} = 1500 / 57,33 = 26,16;$$

$$U_{PVIS} = 26,16 \cdot 41,95 = 1097,41 < 1500 \text{ В}$$

Для виконання умови максимального використання приймемо кількість послідовно з'єднаних модулів: - (N_u),

$$4 \cdot 20 + 3 \cdot 20 + 2 \cdot 19 + 2 \cdot 15 = 182 \text{ шт.}$$

Розрахунок сумарної номінальної потужності (STC) ФЕМ, приєднаних до двох інверторів DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM-4, що характеризується максимальною потужністю генерації.

$$P = P_{max} \cdot N_u \cdot N_{Imax} \cdot n = 550 \cdot 91 = 50\,050 \text{ Вт.}$$

Отримане значення задовольняє $PCTU = 50,05$ кВт наведене в паспорті інвертору DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM-4. Проте потрібно враховувати, що розрахунок виконувався на основі умов STC, які можуть існувати, для даної

широти тільки 1 год. в період з травня по серпень за умови, що температура фотоелектричного елемента буде рівною 25° С (що майже неможливо, враховуючи те, що фотоелектричні елементи під час роботи нагріваються до 45°С). Більшість часу фотоелектричні модулі будуть працювати за умов NOCT, тоді потужність, що видається у систему, становитиме:

$$P = P_{\max} \cdot N_u \cdot N_{I_{\max}} \cdot n = 411,1 \cdot 91 = 37\,410,1 \text{ Вт.} < 50000 \text{ Вт}$$

3.5.3 Кабельне господарство

У даному проекті буде розглянуто кабельні системи:

- сонячні кабелі постійного струму до 1 кВ
- кабелі змінного струму на напругу до 1 кВ;

З'єднання фотоелектричних модулів (ФЕМ) в ланцюг (String), з послідовним підключенням використовується кабельно-провідникова продукція марки КВЕ 1х6 мм² або аналог (сонячний одножильний багато дрововий кабель), розрахункового перерізу. З'єднання сонячних кабелів виконується за допомогою конекторів «папа-мама» марки MC4. Прокладка кабелю постійного струму від панелей до інвертору здійснюється по покрівлі та стіні будівлі з використанням кабельних коробів.

Підключення інверторів DEYE SUN-50K-SG01HP3-EU-BM-4 до щиту ВРП замовника (через щит захисту), виконується кабелем ВВГнгд 4х25+ ПВ-3 нгд 16 ж/з мм² по конструкціям та стінам в ПВХ трубах, в повітрі по існуючим опорам, визначеною та погодженою замовником трасою.

Перерізи провідників, для постійного або змінного струму, визначені з урахуванням падіння напруги, від кожного окремого ФЕМ до інвертору, від інвертору до щиту підключення. Сумарне падіння напруги в провіднику не повинно перевищувати 0,5 В для кабелів постійного струму та 2% для кабелів змінного струму при максимальних втратах.

Переріз кабелів визначено, за такими параметрами:

- Номінальний струм I_n
- Номінальний струм запобіжних пристроїв $I_{з.п.}$

- Максимально допустимий робочий струм кабелів згідно їх умов експлуатації і прокладки і т.д.
- Максимальне падіння напруги. $\Delta U\%$.

3.6 Охорона праці

Встановлення, експлуатація та технічне обслуговування модернізованої сонячної енергетичної системи потужністю 100 кВт з акумуляторною батареєю ємністю 120 кВт·год вимагають суворого дотримання протоколів охорони праці для забезпечення захисту персоналу об'єкта, підрядників з технічного обслуговування, пацієнтів та відвідувачів. Модернізована система створює специфічні електричні та хімічні небезпеки, що вимагають комплексного управління безпекою на всіх етапах життєвого циклу проекту.

Всі електромонтажні роботи виконувалися виключно сертифікованими фахівцями, які мають відповідну кваліфікацію в області проектування фотоелектричних систем, високовольтних електричних систем постійного струму та установки акумуляторних батарей. Монтаж виконувався в суворій відповідності до національних електричних норм, місцевих будівельних норм та спеціальних вимог безпеки, обов'язкових для медичних установ. Конструкція системи включає кілька рівнів електричного захисту, включаючи комплексні системи заземлення, захист від перенапруги, вимикачі дугового замикання на всіх ланцюгах постійного струму та пристрої захисту від замикання на землю. Кожен електричний компонент, розподільна коробка та вимикач мають чітке, стійке маркування з попередженням про подвійні джерела живлення, високу напругу постійного струму та належні процедури вимкнення.

Система акумуляторних батарей літій-іонних акумуляторів потужністю 75 кВт·год вимагає дотримання спеціальних правил безпеки, що передбачають використання спеціальних протоколів. Акумулятор встановлено в спеціально спроектованому приміщенні з контрольованою вентиляцією для запобігання потенційному накопиченню газу, регулюванням температури для підтримання оптимальних умов експлуатації в діапазоні 15–25 °C та системами пожежогасіння, спеціально призначеними для пожеж класу C, пов'язаних з електрообладнанням та акумуляторами. Доступ до приміщення з акумулятором

обмежено лише уповноваженим персоналом, а всередині та зовні приміщення розміщено відповідні попереджувальні знаки, електронні засоби контролю доступу та засоби аварійного вимкнення. Інтегрована система управління акумуляторною батареєю постійно контролює критичні параметри, включаючи температуру елементів, напругу, силу струму та стан заряду, автоматично відключаючи систему та спрацьовуючи сигнали тривоги у разі виявлення потенційно небезпечних умов.

Були впроваджені комплексні програми навчання персоналу, що охоплюють різні сфери безпеки. Операційний персонал проходить навчання з розпізнавання стану системи, розуміння нормальних та несправних умов, а також відповідних дій у разі спрацьовування сигналу тривоги. Персонал з технічного обслуговування проходить спеціальне навчання з процедур блокування/маркування, характерних для фотоелектричних систем, де провідники під напругою можуть залишатися під напругою навіть після відключення від навантаження через безперервне виробництво сонячної енергії. Весь персонал розуміє, що небезпека від постійного струму принципово відрізняється від звичайних систем змінного струму, представляючи більш високий ризик тривалого дугового розряду та більш серйозну небезпеку ураження струмом. Вимоги до засобів індивідуального захисту суворо дотримуються, включаючи ізольовані рукавички, розраховані на напругу системи, захисні окуляри та засоби захисту від падіння для будь-яких робіт з технічного обслуговування на даху.

Для забезпечення охорони праці і техніки безпеки проектом передбачено:

- використання технічно досконалого обладнання;
- розташування обладнання, яке забезпечує його доступне обслуговування;
- виконання заземлюючих пристроїв елементів з нормованою величиною опору і конструкцією, що відповідає нормам;
- використання при виконанні будівельно-монтажних робіт машин і механізмів, в конструкції яких закладені принципи охорони праці;

- висока ступінь механізації будівельно-монтажних робіт;
- виконання будівельно-монтажних робіт відповідно до типових технологічних карт.

Для забезпечення охорони праці і техніки безпеки необхідно, щоб будівельні, монтажні і налагоджувальні роботи та експлуатація електроустановок виконувались у відповідності з діючими нормами.

Прокладка кабелів по існуючим конструкціям і поряд з існуючими кабелями, які знаходяться під напругою, повинно виконуватись у відповідності нормам з дотриманням нормованих відстаней від проводів і кабелів до працюючих механізмів, їх належного заземлення та інших заходів по забезпеченню безпеки проведення робіт. В тих випадках, коли вимоги норм в частині відстаней від елементів, які знаходяться під напругою діючих електроустановок до працюючих механізмів витримати неможливо, необхідно відключати та заземлювати ці електроустановки. Пожежна безпека електромереж 0,4 і 0,22 кВ та розподільчих пристроїв забезпечується застосуванням негорючих матеріалів і конструкцій, автоматичним відключенням струмів короткого замикання, заземленням [30].

В випадку використання вантажопідйомних механізмів (монтажних люльок, тросів, монтажних поясів безпеки тощо) для встановлення PV модулів на каркасі повинно бути виконано:

- перевірка строків їх іспиту, справний зовнішній вигляд;
- інструктаж бригади монтажників по роботі з підвищеною небезпекою на робочому місці з записом в журнал перевірки знань.

Технічне обслуговування здійснюється відповідно до суворих протоколів безпеки, включаючи обов'язкову роботу мінімум двох осіб для виконання електромонтажних робіт, планування очищення та огляду панелей за відповідних погодних умов, а також щорічні перевірки безпеки сторонніми організаціями. Інтеграція з критичною медичною інфраструктурою об'єкта забезпечує безпеку пацієнтів за допомогою автоматичних перемикачів, що забезпечують безперебійне переключення живлення, пріоритетного резервного живлення від акумуляторів для систем життєзабезпечення та операційних,

щомісячних протоколів тестування з повною документацією, а також екранування електромагнітних перешкод, що захищає чутливе діагностичне та контрольне обладнання від електричних перешкод, що генеруються системами перетворення енергії.

3.7 Визначення екологічних переваг

Розширення сонячної енергетичної системи з 30 кВт до 100 кВт з інтегрованою акумуляторною системою на 120 кВт·год забезпечує істотні та вимірювані екологічні переваги, що відповідають місії підприємства щодо сприяння благополуччю громади. Ця інвестиція в інфраструктуру відновлюваної енергії демонструє реальну прихильність до охорони навколишнього середовища, одночасно створюючи значні екологічні переваги на місцевому, регіональному та глобальному рівнях.

Модернізована система генерує приблизно 75 000 кВт·год додаткової чистої відновлюваної електроенергії щорічно порівняно з попередньою установкою. Ця сонячна енергія безпосередньо замінює електроенергію, яка інакше вироблялася б на електростанціях, що працюють на викопному паливі, переважно на вугільних і газових електростанціях, які домінують у більшості регіональних електромереж. Виходячи із середніх коефіцієнтів викидів електромережі 0,7-0,8 кг CO₂ на кВт·год, розширена сонячна система запобігає викидам приблизно 63-72 тонн вуглекислого газу щороку. Для контекстуалізації цього впливу, щорічне скорочення викидів дорівнює виведенню з доріг 13-15 легкових автомобілів, компенсації викидів вуглецю приблизно 1050-1200 зрілих дерев або запобіганню спалюванню 7100-8100 галонів бензину.

Окрім вуглекислого газу, система усуває численні інші шкідливі забруднювачі, пов'язані зі спалюванням викопного палива. Щорічні екологічні вигоди включають запобігання викидам приблизно 54 кілограмів діоксиду сірки, який сприяє утворенню кислотних дощів, підкислення екосистеми та проблемам зі здоров'ям дихальних шляхів, включаючи астму та бронхіт. Крім

того, система запобігає викидам 23 кілограмів оксиду азоту щорічно, забруднюючих речовин, які сприяють утворенню приземного озону, розвитку смогу та респіраторних захворювань. Зменшення викидів твердих частинок, хоча і важче точно виміряти, забезпечує подальше поліпшення якості повітря, що приносить користь навколишньому суспільству [31].

Акумуляторна батарея ємністю 120 кВт·год покращує загальні екологічні показники, максимально використовуючи вироблену сонячну енергію та забезпечуючи реалізацію складних стратегій управління енергоспоживанням. Акумуляторна система зберігає надлишок сонячної енергії, виробленої в періоди пікового навантаження, і розряджає цю чисту енергію в вечірні години, коли попит на електроенергію залишається високим, але сонячна генерація припиняється. Ця здатність до перенесення навантаження зменшує залежність від електроенергії з мережі в періоди пікового попиту, коли комунальні підприємства зазвичай запускають менш ефективні електростанції з вищими викидами. Згладжуючи профіль попиту закладу та зменшуючи навантаження на регіональну інфраструктуру мережі, акумуляторна система опосередковано сприяє підвищенню ефективності мережі та зменшенню викидів, що виходить за межі прямих переваг сонячної енергії.

Якщо розглянути життєвий цикл системи протягом передбачуваного 25-річного терміну експлуатації, сукупні екологічні переваги стають ще більш вражаючими. Загальне скорочення викидів CO₂ перевищить 1575 тонн, з пропорційним скороченням інших забруднюючих речовин. Видима прихильність об'єкта до відновлюваної енергії також надає цінні освітні та демонстраційні переваги, демонструючи пацієнтам, персоналу, студентам-медикам та ширшій медичній спільноті стійку інфраструктуру охорони здоров'я. Ця провідна роль може стимулювати додаткове впровадження відновлюваної енергії в усьому регіональному медичному секторі, збільшуючи вплив на навколишнє середовище за межами окремого закладу. Проект робить значний внесок у досягнення регіональних цілей у сфері відновлюваної енергії, зобов'язань щодо боротьби зі зміною клімату та цілей сталого розвитку, встановлених місцевими органами влади та мережами охорони здоров'я [32-33].

Висновки до розділу 3

У цьому розділі наведено вичерпне технічне та економічне обґрунтування проекту модернізації сонячної електростанції на основі детального кількісного аналізу та багатовимірної оцінки впливу. Розрахунки щодо генерації показують, що модернізація потужності з 30 кВт до 100 кВт за допомогою сучасного високоефективного обладнання збільшує річний обсяг виробництва електроенергії до 105 000 кВт·год.

Економічна оцінка показує переконливі фінансові результати з річною економією на експлуатації, простим періодом окупності 4 роки і чистою теперішньою вартістю, що перевищує 583 625 доларів протягом 25-річного терміну експлуатації системи. Додавання акумуляторної батареї ємністю 120 кВт·год дозволяє реалізувати стратегії згладжування пікових навантажень і забезпечити резервне електропостачання, що безпосередньо підвищує енергоефективність і експлуатаційну стійкість медичного закладу.

Було представлено робочу документацію проекту з модернізації сонячної електростанції, в якій теоретичний аналіз і проектні концепції перетворено на детальні технічні специфікації та реалізовані інженерні рішення. Технічні специфікації встановлюють точні параметри для всіх компонентів системи, забезпечуючи відповідність чинним стандартам і нормативним вимогам до електричних установок.

Протоколи безпеки праці забезпечують захист персоналу та пацієнтів завдяки комплексним заходам електробезпеки, заходам безпеки акумуляторної батареї та інтеграції з критично важливими медичними системами. Аналіз впливу на навколишнє середовище кількісно оцінює істотні переваги, включаючи скорочення викидів CO₂ на 63-72 тонни на рік та усунення шкідливих забруднюючих речовин.

РОЗДІЛ 4

СТАРТАП-ПРОЕКТ

4.1 Опис стартап-проекту

Стартап-проект передбачає розробку та комерціалізацію комплексного рішення з модернізації сонячних електростанцій промислових об'єктів з метою підвищення енергоефективності та зниження витрат на електроенергію. Рішення охоплює технічний аудит існуючої СЕС, оцінку деградації фотоелектричних модулів і стану інверторного обладнання, а також проектування оновленої конфігурації станції з можливим переходом на гібридну архітектуру та інтеграцією системи накопичення енергії (BESS).

Таблиця 4.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Модернізація промислових СЕС (заміна ФЕМ/інверторів, інтеграція BESS)	Промислові підприємства та об'єкти з даховими СЕС	Зростання генерації, підвищення самоспоживання, зменшення витрат на електроенергію
Інтеграція системи накопичення енергії та керування режимами (BESS)	Об'єкти з піковими навантаженнями та високою ціною е/е	Peak-shaving, резервування, підвищення енергонезалежності
Технічний аудит, діагностика та оцінка деградації СЕС	Станції, що працюють понад 8–10 років	Виявлення втрат, обґрунтування модернізації, підвищення продуктивності
Моніторинг і диспетчеризація (SCADA/EMS)	Підприємства зі змінним графіком навантаження	Контроль показників, швидке виявлення несправностей, оптимізація споживання
Техніко-економічне обґрунтування модернізації (CAPEX/OPEX, ROI)	Підприємства, що приймають інвестиційні рішення	Прозорий розрахунок окупності, вибір оптимального сценарію модернізації
Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Модернізація існуючих промислових СЕС шляхом заміни фотоелементів, інверторів та інтеграції BESS	Промислові підприємства; виробничі цехи; логістичні хаби	Зростання самоспоживання; зменшення витрат на електроенергію; підвищення надійності
Технічний аудит та моделювання економічного ефекту	Підприємства, що мають СЕС старше 10–12 років	Прозорий прогноз окупності та зменшення енерговитрат
Впровадження оптимізованої системи керування	Об'єкти з нестабільними графіками навантаження	Зниження пікових навантажень, резерв електроживлення

У процесі впровадження система базується на даних реального споживання підприємства, профілях навантаження та фактичних показниках генерації, що дозволяє сформувати оптимальні технічні рішення: заміну або додавання фотоелектричних модулів, модернізацію інверторів, оптимізацію схем BoS (кабельні лінії, захисти, щити, заземлення) та налаштування режимів роботи BESS. Після модернізації програмно-апаратний модуль керування забезпечує пріоритет самоспоживання, зменшення пікової потужності за рахунок згладжування навантаження та підтримку резервного живлення критичних споживачів, відповідно це має позитивний вплив на загальну систему мережі на підприємстві.

Таким чином, стартап пропонує підприємствам не лише оновлення обладнання, а й керовану енергосистему, яка забезпечує вимірюваний ефект “до/після”: збільшення частки власного використання сонячної енергії, зниження закупівлі з мережі у дорогі години, підвищення надійності електропостачання та скорочення операційних витрат протягом усього терміну експлуатації.

Ключові компоненти

Модуль енергоаудиту та аналізу навантаження

Компонент збирає та структурує дані про електроспоживання підприємства (погодинні/15-хвилинні профілі), визначає базове та пікове навантаження, критичні споживачі, сезонність і точки найбільших втрат. Виконує попередню оцінку потенціалу підвищення самоспоживання та зменшення пікової потужності. Роль: формує технічні вимоги до модернізації та цільові KPI (самоспоживання, peak-shaving, резервування).

Система моніторингу генерації та технічного стану СЕС

Модуль отримує дані з інверторів, лічильників, стрінг-боксів, датчиків (за наявності), аналізує виробіток, втрати, дисбаланс по стрінгах, можливі затінення/контактні проблеми та деградацію ФЕМ. За потреби враховує метеодані для коректної нормалізації генерації.

Роль: дає “реальну картину” ефективності СЕС та обґрунтовує потребу в заміні обладнання.

Модуль підбору та оптимізації складу модернізації

Компонент розраховує варіанти модернізації: заміна ФЕМ, перехід на гібридні інвертори, підбір BESS (потужність/ємність), оновлення BoS (кабелі, захисти, щити, заземлення). Ураховує технічні обмеження об’єкта (підключення, допустимі струми/напруги, площі, режими роботи). Роль: формує оптимальний технічний сценарій “що саме міняємо” і “який ефект отримаємо”.

Алгоритм керування енергопотоками (EMS)

Центральний логічний компонент, який керує режимами роботи гібридної СЕС та BESS: пріоритет самоспоживання, згладжування піків (зменшення пікової потужності), обмеження відбору/віддачі, резерв для критичних споживачів, захист батареї (SoC/SoH/температура). Роль: забезпечує максимальний енергоефект від модернізації в реальних режимах підприємства.

5) Система автоматичного управління обладнанням

Виконавчий модуль реалізує команди EMS на обладнанні: інвертор, BMS, комутаційна апаратура, лічильники/контролери. Підтримує промислові протоколи (Modbus, CAN тощо), контролює коректність перемикачів і реагує на аварійні режими.

Роль:

переводить “розрахункову стратегію” в реальну роботу установки без ручного втручання.

6) Платформа моніторингу, аналітики та звітності

Веб-кабінет/панель енергоменеджера (за потреби — мобільний доступ) відображає генерацію/споживання/SoC, KPI, аварії, статистику та звіти “до/після модернізації”. Містить економічний блок: CAPEX/OPEX, окупність, щомісячний ефект, порівняння сценаріїв. Роль: забезпечує прозорість результатів, контроль ефективності та підґрунтя для управлінських рішень.

Таблиця 4.2 - Ключові компоненти стартап-проекту

Компонент	Опис	Роль у проєкті
Модуль енергоаудиту та аналізу навантаження	Збір та обробка історичних даних споживання (погодинно/похвилинно), виділення піків, базового навантаження, критичних споживачів	Визначає “де саме губляться гроші” та формує вимоги до модернізації (ціль самоспоживання, peak-shaving, резервування)
Система моніторингу генерації СЕС	Збір даних з інверторів, стрінг-боксів, лічильників, метеоданих; контроль продуктивності по стрінгах, виявлення затінь/деградації	Показує реальну ефективність СЕС, причини падіння генерації та точки для технічного покращення
Модуль підбору та оптимізації складу модернізації	Розрахунок варіантів: заміна ФЕМ, інверторів (мережевий/гібридний), підбір BESS (потужність/ємність), захисти, BoS; технічні обмеження об’єкта	Дозволяє вибрати найкращий сценарій модернізації за критеріями ефекту, бюджету, окупності та надійності
Алгоритм керування енергопотоками (EMS)	Логіка роботи гібридної СЕС + АКБ: заряд/розряд, обмеження потужності, пріоритет самоспоживання, згладжування піків, захист АКБ (SoC/SoH)	Максимізує самоспоживання, зменшує пікове навантаження на мережу та підвищує енергоефективність підприємства

4.2 Аналіз ринку

Ефективна реалізація стартап-проекту з модернізації сонячних електростанцій (СЕС) промислових об’єктів потребує всебічного аналізу ринкового середовища. Оцінювання цільової аудиторії, конкурентного поля, актуальних потреб і бар’єрів входу дає змогу сформуванню обґрунтовану стратегію виходу на ринок, знизити ризики та підвищити ймовірність комерційного успіху.

Цільова аудиторія. Основними споживачами проєкту є промислові підприємства, які вже експлуатують СЕС (особливо встановлені 8–15 років тому) або планують її модернізацію з метою зменшення витрат на електроенергію та підвищення енергоефективності. До цієї групи належать виробничі майданчики, логістичні комплекси, склади, агропідприємства, а також об’єкти з критичними споживачами, для яких важливі резервування та стабільність електропостачання. Рішення про модернізацію зазвичай ухвалюють керівники підприємств, фінансові директори, головні енергетики та енергоменеджери, орієнтовані на скорочення операційних витрат і підвищення енергетичної автономії.

Конкурентне середовище. На українському ринку представлені компанії, що виконують проєктування та будівництво нових СЕС “під ключ”, проте окремий сегмент саме модернізації існуючих промислових СЕС (з акцентом на аудит деградації інтеграцію BESS) є менш насиченим. Конкуренція переважно формується з боку ЕРС-підрядників та інтеграторів, які можуть пропонувати заміну окремих компонентів, але не завжди забезпечують системний підхід із вимірюваним ефектом “до/після” та оптимізацією режимів роботи підприємства.

Потенційні партнери. Партнерське поле проєкту включає постачальників фотоелектричних модулів, інверторів і BESS, монтажні та проєктні організації, енергосервісні компанії (ЕСКО), а також компанії, що впроваджують системи енергоменеджменту на підприємствах. Додатковими партнерами можуть виступати фінансові установи та програми підтримки енергоефективності (гранти/пільгове кредитування), які підвищують доступність модернізації для бізнесу та прискорюють масштабування.

Потреби ринку. Ключові потреби споживачів у даному сегменті пов’язані з:

- зниженням витрат на електроенергію шляхом підвищення частки самоспоживання.
- відновленням/стабілізацією генерації на “старих” СЕС через деградацію ФЕМ та застарілі інвертори.
- зменшенням пікової потужності та підвищенням керованості навантаження (зокрема за рахунок BESS).
- підвищенням надійності електропостачання та резервування критичних ліній.
- отриманням прозорого техніко-економічного обґрунтування модернізації (окупність, ROI, сценарії тарифів і режимів роботи).

Тенденції ринку. Поточна динаміка енергетичного сектору формує зростаючий попит на модернізацію СЕС. Основними тенденціями є: підвищення тарифного навантаження на бізнес, прагнення підприємств до енергонезалежності, активне поширення систем накопичення енергії для резервування та згладжування навантаження, а також розвиток практик

енергоменеджменту (включно з підходами ISO 50001). У цих умовах модернізація СЕС переходить із “опції” в інструмент стратегічної оптимізації витрат і підвищення стабільності виробництва.

Маркетингові стратегії. Для виходу на ринок доцільними є:

- виконання пілотних модернізацій на показових об’єктах із демонстрацією ефекту “до/після”.
- формування кейсів із чіткими КРІ (самоспоживання, зменшення піку, економія, окупність).
- партнерська модель з ЕРС/ЕСКО та постачальниками обладнання;
- освітні матеріали для керівників і енергоменеджерів (вебінари, статті, калькулятори окупності);
- B2B-просування через галузеві події та профільні медіа, а також точкова робота з підприємствами, які вже мають СЕС старшого покоління.

Бар’єри виходу на ринок. До ключових обмежень належать: значний обсяг початкових інвестицій для модернізації (особливо при інтеграції BESS), складність інтеграції з існуючою електроінфраструктурою підприємства, тривалий цикл ухвалення рішень у корпоративному сегменті, а також потреба в точних вихідних даних (навантаження, генерація, реальний стан обладнання). Додатковим бар’єром може виступати консервативність частини підприємств, які відкладають модернізацію до моменту суттєвого зниження продуктивності СЕС або зростання аварійності.

Проведений аналіз демонструє, що ринок модернізації промислових СЕС має значний потенціал розвитку. Поєднання високої актуальності енергоефективності для бізнесу, наявності великої кількості СЕС із тривалим строком експлуатації та зростання інтересу до BESS створює сприятливі умови для впровадження комплексного рішення з модернізації, що забезпечує вимірюваний технічний і економічний ефект.

SWOT-аналіз стартап-проєкту

Таблиця 4.3 - SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
Комплексність рішення: аудит → модернізація СЕС → інтеграція BESS → оптимізація режимів роботи	Високий CAPEX модернізації (особливо при впровадженні BESS)
Вимірюваний економічний ефект: зростання самоспоживання, зменшення пікової потужності, зниження витрат	Тривалий цикл погоджень на підприємстві (закупівлі, тендери, внутрішні регламенти)
Підвищення надійності: резервування критичних споживачів, зменшення залежності від мережі	Складність інтеграції зі старим обладнанням та існуючою електроінфраструктурою об'єкта
Можливість швидкого підвищення генерації шляхом заміни деградованих/застарілих ФЕМ	Потреба у кваліфікованих інженерах для проєктування, налаштування та O&M
Гнучкість під різні об'єкти: дахові/наземні СЕС, різні графіки навантаження, різні тарифи	Ризики помилок у вихідних даних (неповні дані лічильників/архівів, некоректний облік)
Масштабованість послуги: типові рішення для промислових майданчиків із можливістю тиражування	Залежність економіки проєкту від тарифів на е/е та режиму роботи підприємства
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
Зростання тарифів на електроенергію для бізнесу → підвищення доцільності модернізації та швидша окупність	Коливання валютного курсу та цін на обладнання (ФЕМ, інвертори, АКБ)
Масовий парк СЕС 2010–2015 років → великий ринок “апгрейду” та заміни застарілого обладнання	Зміни регуляторних умов (правила приєднання, облік, обмеження генерації)
Попит на енергонезалежність і резервне живлення для критичних процесів підприємств	Посилення конкуренції з боку великих ЕРС/інтеграторів та виробників “під ключ”
Розвиток енергоменеджменту (ISO 50001) та потреба в системному контролі енергоспоживання	Зниження інвестиційної активності бізнесу через економічні ризики
Партнерства з ЕСКО, монтажними організаціями, постачальниками інверторів і BESS	Технічні ризики: неправильний підбір BESS/інверторів може знизити фактичний ефект

4.3 Розробка ринкової стратегії стартап-проєкту

Проведено вибір цільових груп споживачів та представлено його в таблиці 4.4.

Потреба в цьому рішенні є актуальною для всіх визначених цільових груп, оскільки модернізація СЕС напряду знижує витрати на електроенергію та підвищує енергоефективність. Стартап-проєкт є комплексним і універсальним, поєднуючи аудит, оновлення обладнання та оптимізацію режимів роботи (за потреби — з BESS).

Таблиця 4.4 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції	Простота входу
Промислові підприємства з даховими/наземними СЕС 30–300 кВт (станції 8–15 років експлуатації)	Висока – є відчутне падіння генерації та зростання витрат на е/е	Високий – великий пул підприємств зі “старими” СЕС	Середня – є ЕРС, але мало спеціалізованих саме на модернізації	Середня – потрібен аудит, доступ до щитових/лічильників
Промислові підприємства з високою ціною простою та критичними споживачами (потреба в резервуванні)	Висока – надійність і резерв часто важливіші за “інноваційність”	Середній – менше об’єктів, але великі бюджети	Середня – конкуренція з дизель-генераторами та UPS-рішеннями	Середня – потрібне погодження схем резервування і захистів
Логістичні комплекси, склади, виробничі майданчики з великою площею покрівлі та денним навантаженням	Висока – добре “лягає” під самоспоживання і зниження піків	Середній	Низька/середня	Висока – проста інтеграція, зрозумілий режим роботи
Компанії з енергоємними процесами та піковими навантаженнями (можливість peak-shaving через BESS)	Середня/висока – рішення приймають після розрахунків ефекту	Середній	Середня	Середня – потрібні точні дані по навантаженню та налаштування EMS
ЕСКО та ЕРС-інтегратори (як партнери для масштабування модернізацій “під ключ”)	Висока – зацікавлені розширювати портфель і швидко запускати проекти	Середній – кількість гравців менша, але кожен веде багато об’єктів	Висока – конкуренція між підрядниками	Висока – партнерська модель, швидкий доступ до клієнтів

Найперспективнішим стартовим сегментом є промислові підприємства з “старими” СЕС, де найчастіше проявляються деградація ФЕМ і застарілі інвертори. Водночас потрібна роз’яснювальна робота з клієнтами, щоб показати вимірюваний ефект модернізації: економію, окупність і підвищення надійності.

Відповідно до описаної стратегії розвитку визначається стратегія конкурентної поведінки стартап-проекту, представлену в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Вибір стратегії конкурентної поведінки

Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики продукту конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Проект можна вважати першопрохідцем у вузькій ніші: не просто монтаж СЕС, а системна модернізація “старих” промислових станцій (8–15 років експлуатації) з поєднанням технічного аудиту, заміни обладнання, гібридизації та інтеграції BESS із розрахунком енергоефекту. На ринку є ЕРС-компанії, але мало рішень, спеціалізованих саме на модернізації з фокусом на енергоефективність і самоспоживання.	Компанія орієнтується передусім на нових споживачів — підприємства, які вже мають СЕС або планують модернізацію через падіння генерації та зростання тарифів. Одночасно можлива конкуренція за клієнта з ЕРС-підприємствами, що виконують “під ключ” нові СЕС, але не дають поглибленого аудиту та оптимізації режимів роботи після модернізації. Фокус на підприємствах-“ранніх послідовниках”, які готові інвестувати у підвищення енергоефективності та резервування.	Компанія не копіює продукт конкурентів у прямому сенсі, але використовує ринкові best practices: типові інженерні рішення з BoS, стандартні схеми захисту/заземлення, підходи O&M та моніторингу. Унікальність формується за рахунок поєднання модернізації + BESS + оптимізації самоспоживання/пиків + техніко-економічного обґрунтування “до/після”.	Стратегія диференціації та спеціалізації. Фокус на вузькому сегменті модернізації промислових СЕС із чітко вимірюваним результатом (зростання самоспоживання, зменшення пікової потужності, підвищення надійності). Швидке формування портфеля кейсів “до/після”, партнерства з ЕСКО/ЕРС та постачальниками інверторів і BESS. Побудова бар’єрів входу через експертизу, методику аудиту та стандартизовані рішення модернізації.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Завершальним етапом розробки ринкової стратегії є визначення маркетингової програми для фінального продукту, який буде представлений потенційному споживачу. Основні переваги наведено в таблиці 4.6

Таблиця 4.6 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує проєкт	Ключові переваги перед конкурентами
Підвищення енергоефективності підприємства	Зменшення питомих витрат електроенергії за рахунок оптимізації генерації та споживання після модернізації СЕС	Рішення “під ключ”: аудит → модернізація → налаштування режимів → контроль ефекту “до/після”
Зниження витрат на електроенергію	Зростання частки самоспоживання та зменшення обсягу купівлі з мережі в години високих тарифів	Вимірюваний результат із прозорою звітністю та розрахунком ROI/окупності
Компенсація деградації та відновлення генерації “старої” СЕС	Підвищення/стабілізація річної генерації через заміну деградованих ФЕМ і оптимізацію інверторної частини	Фокус саме на модернізації СЕС 8–15 років експлуатації (не лише нове будівництво)
Зменшення пікової потужності та штрафів/перевищень	Peak-shaving (згладжування піків) за рахунок BESS і керування навантаженням → нижчі платежі та менше ризиків перевищень	Інженерний підхід: підбір BESS під реальний графік навантаження, а не “типова батарея”
Підвищення надійності та резервування критичних споживачів	Забезпечення живлення критичних ліній під час аварій/відключень (за рахунок гібридного інвертора + BESS)	Гнучкі сценарії: пріоритет енергоефекту або резерву залежно від потреб підприємства
Автоматизація керування модернізованою енергосистемою	Стабільна робота без постійного ручного контролю: пріоритет самоспоживання, заряд/розряд АКБ, обмеження потужності	Сумісність із промисловими протоколами (Modbus/CAN), контроль безпеки та журналювання подій
Прозорість і контроль показників (KPI енергоменеджменту)	Моніторинг генерації/споживання/SoC, аварій, ефективності; звіти за добу/місяць, “до/після”	Орієнтація на задачі енергоменеджера (KPI, базові лінії, ефект від заходів)
Зменшення інвестиційних ризиків модернізації	Техніко-економічне обґрунтування (CAPEX/OPEX, окупність, сценарії тарифів, деградації) до старту робіт	Рішення приймається на основі розрахунків і даних, а не “оцінок підрядника”

Висновки до розділу 4

У підсумку розділу стартап-проєкту обґрунтовано концепцію комплексного рішення, спрямованого на модернізацію промислових сонячних електростанцій із метою підвищення енергоефективності підприємств та зниження витрат на електроенергію. Показано, що найбільший ефект забезпечує системний підхід, який поєднує технічний аудит існуючої СЕС, підбір оптимального складу модернізації (оновлення фотоелектричних модулів, інверторного обладнання, елементів BoS), а за потреби — інтеграцію системи

накопичення енергії та налаштування режимів роботи під фактичний графік навантаження об'єкта.

Виконаний аналіз ринку підтвердив наявність стабільного попиту на модернізацію СЕС у промисловому секторі, зокрема серед підприємств, що експлуатують станції тривалий час і стикаються зі зниженням генерації та зростанням тарифного навантаження. SWOT-аналіз засвідчив конкурентні переваги проєкту: вимірюваний економічний ефект, масштабованість, можливість підвищення самоспоживання, зменшення пікової потужності та підвищення надійності електропостачання. Водночас визначено ключові бар'єри впровадження — капіталомісткість модернізації, складність інтеграції з існуючою інфраструктурою та тривалі цикли прийняття рішень у корпоративному сегменті — що потребує чіткої демонстрації результатів “до/після” і підготовки техніко-економічного обґрунтування для кожного об'єкта.

Отже, стартап-проєкт є практично орієнтованим та комерційно перспективним, оскільки пропонує підприємствам не окрему послугу монтажу, а керовану модернізовану енергосистему з прозорими KPI та прогнозованою окупністю. Реалізація запронованого підходу створює передумови для підвищення енергетичної стійкості промислових об'єктів, зменшення залежності від мережі та системного впровадження заходів енергоефективності на базі відновлюваних джерел енергії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі досліджено процедуру модернізації інфраструктури сонячної енергетики в медичному та профілактичному закладі, що дозволяє продемонструвати як технічну і економічну ефективність враховуючи застарілість систем генерації. Завдяки систематичному аналізу, що охоплює теоретичні основи, методології модернізації, техніко-економічну оцінку та детальну інженерну документацію, розроблено механізми зміни структури системи електропостачання для впровадження передових гібридних систем сонячної енергетики в критично важливих закладах охорони здоров'я.

Дослідження підтвердило, що існуюча сонячна електростанція потужністю 30 кВт, підключена до електромережі, незважаючи на безперервну роботу протягом 15 років, зменшила свою продуктивність через природне зношування модулів та застарілу технологію інверторів. Запропонована модернізація до гібридної системи потужністю 100 кВт з акумуляторною батареєю ємністю 120 кВт·год збільшує генерацію на 75 000 кВт·год на рік.

Проведений економічний аналіз демонструє стійкі фінансові показники: загальна інвестиція в розмірі 91 500 доларів США приносить щорічну економію в розмірі 23 000 доларів США, термін окупності складає 4 роки. Внутрішня норма прибутковості значно перевищує типові показники інвестицій в інфраструктуру, що підтверджує фінансову привабливість проекту. Окрім прямих економічних вигод, інтеграція акумуляторних батарей забезпечує критично важливу резервну потужність, необхідну для медичних закладів, дозволяє застосовувати складні стратегії управління енергією, включаючи згладжування пікових навантажень та оптимізацію попиту, а також підвищує загальну стійкість об'єкта до перебоїв у роботі електромережі.

Визначена оцінка впливу на навколишнє середовище, яка включає щорічне скорочення викидів CO₂ на 63-72 тонни та усунення шкідливих забруднюючих речовин, таких як діоксид сірки та оксиди азоту, що безпосередньо підтримує місію медичного закладу щодо сприяння охороні здоров'я населення. Розроблені комплексні протоколи з охорони праці

забезпечують захист персоналу, пацієнтів та обладнання на всіх етапах експлуатації.

Розроблена робоча документація проекту, що включає технічні специфікації, електротехнічні рішення, захисні заходи та протоколи безпеки. Це дослідження демонструє, що стратегічна модернізація інфраструктури відновлюваної енергії є не просто технічним оновленням, а багатогранною інвестицією, що забезпечує фінансову віддачу, оперативну стійкість, екологічну відповідальність та відповідність інституційним цінностям, створюючи модель, яку можна повторити для медичних закладів, що прагнуть до переходу на стійку енергетику.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кудря С.О. «Відновлювані джерела енергії» - Київ, 2024.
2. Світові тенденції та зміни на ринку сонячної енергетики 2025–2029 роки [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://eba.com.ua/svitovi-tendentsiyi-ta-zminy-na-rynku-sonyachnoyi-energetyky-2025-2029-roky/>
3. Технічна продуктивність сонячних батарей [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://axiomplus.com.ua/ua/news/effektivnost-solnechnyh-panelej/?srsltid=AfmBOopFU7BIHDJ_tN0-ebM4IQs7QW6vhxGnZk_BSv8MDLnk4H9Y2Xxr
4. Концентрована сонячна енергія [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://ua.dsisolar.com/info/concentrated-solar-power-projects-fast-gaining-37569198.html>
5. О. М. Суходоля, А. Ю. Сменковський, А. І. Шевцов, М. Г. Земляний «Стан і перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні» – Київ, 2014 р
6. Степаненко В. А., Замулко А. І., Веремійчук Ю. А., Находов В.Ф. Оцінка ризиків при інтеграції відновлюваних джерел енергії до системи електропостачання. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. № 2. С 64-74. ISSN 1813-5420 (Print)
7. Anatolii Zamulko, Yurii Veremiichuk, Vitalii Stepanenko. Formation of risk profile for the integration of renewable energy sources into the electricity supply system. Journal of new technologies in environmental science. No. 4 Vol. 6. P 119-128. ISSN 2544-7017 DOI: 10.53412/jntes-2022-4-2
8. V A Stepanenko, A I Zamulko, Y A Veremiichuk. Fuzzy logic in the decision-making tasks of connecting renewable energy sources into the electricity supply system IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1254 (2023) 012043 DOI 10.1088/1755-1315/1254/1/012043
9. Іван Притискач, Віталій Опришко, Юрій Веремійчук, Олена Ярмолук функціонування установок зберігання енергії на ринку допоміжних послуг у контексті резерву підтримки частоти. Вісник КрНУ імені Михайла

Остроградського. Випуск 3/2023 (140). С. 118-132. DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.3.14>

10. Богуш І.Л. «Сонячні енергоустановки малої потужності» - Київ, 2018.
11. Y A Veremiichuk, V P Opryshko, I V Prytyskach, O S Yarmoliuk. Prospects for autonomous low-power renewable energy communities. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1415 (2024) 012120. DOI:10.1088/1755-1315/1415/1/012120
12. А. Пустовий, Ю. Веремійчук Особливості функціонування сонячної генерації малої потужності в ОЕС України в умовах зеленої трансформації ЕНЕРГЕТИКА І АВТОМАТИКА № 1 (2024) ISSN: 2223-0858 DOI: [http://dx.doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.102](http://dx.doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.102) С. 102-113
13. Ярушина Є.В. «Автономні системи живлення» – Суми, 2018.
14. Електричні технології [Електронний ресурс] - Режим доступу: www.electricaltechnology.org
15. Енергетична криза 20 століття [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://drukarnia.com.ua/articles/energetichna-kriza>
16. Парфенюк О.А. «Електричні системи та мережі» - Чернівці, 2013.
17. Арсенід галію: структура, властивості, використання, ризики [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://maestrovirtuale.com/uk/>
18. Рогоза М.В. «Сучасна перетворювальна техніка» - Дніпро, 2022.
19. Дугай Т.Г. «Перетворювальна техніка у ВДЕ» - Харків, 2019
20. Однофазний інвертор: типи, застосування [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://uk.sunplusnenergy.com/news/single-phase-inverter---types-applications.html>
21. М. І. Шпіка, С. О. Закурдай, В. А. Герасименко «Силові перетворювачі для автоматизованого електроприводу» - Харків, 2019
22. Системи зберігання енергії [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://greenlineenergy.com.ua/energy-independence/?utm_source=google&utm_m
23. Що таке літій-іонні акумулятори [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.roypow.com/uk/blog/what-are-lithium-ion-batteries>

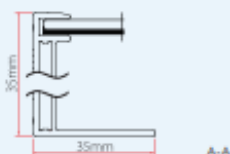
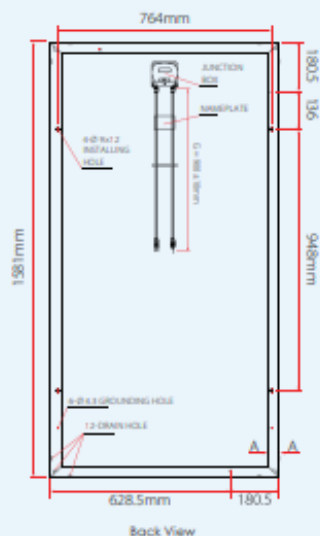
24. Кувшинов В. В. «Підвищення потужності серійних сонячних установок при комбінованій виробітці теплової та електричної енергії» - Київ, 2011.
25. Кожем'яко В.П. «Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики» - Вінниця, 2011.
26. Бudyко В. І. «Сучасні технологічні процеси, обладнання та устаткування фотоелектричного перетворення сонячної енергії» - Київ , 2015.
27. Даташит (технічні характеристики) [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://e-energy.in.ua/files/growatt-mid-30tl3-x-datasheet-ru.pdf>
28. Технологія PERC [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://avenston.com/articles/perc/>
29. Високовольтні системи [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/reference-information/11144.html>
30. Електричні технології та інженерія [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10749-018-0914-4>
31. Лис Ю.О., Пітікар М.І. «Інструкція з охорони праці для співробітників відділу енергетики» – Вінниця, 2024.
32. Равлюк О.В. «Перспективи використання сонячних електростанцій» - Чернівці, 2023
33. Нечаєва Т.П., Шульженко С.В., Сас Д.П., Парасюк М.В. «Фактори екологічного впливу електроенергетичних об'єктів на довкілля» - Київ, 2008.

ДОДАТКИ

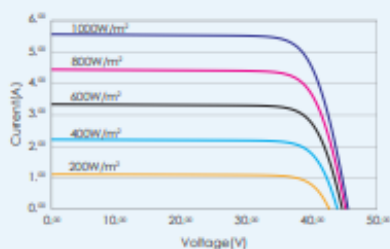
Додаток А

TSM-DC01A / TSM-DA01A THE Comax SOLUTION

DIMENSIONS OF PV MODULE TSM-DC/DA01A



I-V CURVES OF PV MODULE TSM-195 DC/DA01A



Average efficiency reduction of 4.5% at 200W/m² according to EN 60904-1.

CERTIFICATION



ELECTRICAL DATA @ STC	TSM-190 DC/DA01A	TSM-195 DC/DA01A	TSM-200 DC/DA01A
Peak Power Watts-P _{max} (Wp)	190	195	200
Power Output Tolerance-P _{max} (%)	0/+3	0/+3	0/+3
Maximum Power Voltage-V _{mp} (V)	36.6	37.1	37.6
Maximum Power Current-I _{mp} (A)	5.19	5.25	5.32
Open Circuit Voltage-V _{oc} (V)	45.1	45.6	46.0
Short Circuit Current-I _{sc} (A)	5.52	5.56	5.60
Module Efficiency η _m (%)	14.9	15.2	15.6

Values of Standard Test Conditions STC (Air Mass AM1.5, Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C). Power measurement Tolerance: ±3%

ELECTRICAL DATA @ NOCT	TSM-190 DC/DA01A	TSM-195 DC/DA01A	TSM-200 DC/DA01A
Maximum Power-P _{max} (Wp)	140	143	147
Maximum Power Voltage-V _{mp} (V)	33.8	34.3	34.8
Maximum Power Current-I _{mp} (A)	4.14	4.18	4.23
Open Circuit Voltage (V)-V _{oc} (V)	41.7	42.2	42.5
Short Circuit Current (A)-I _{sc} (A)	4.44	4.47	4.5

NOCT: Irradiance of 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s. Power measurement Tolerance: ±3%

MECHANICAL DATA

Solar cells	Monocrystalline 125 × 125mm (5 inches)
Cell orientation	72 cells (6 × 12)
Module dimensions	1581 × 809 × 35mm (62.24 × 31.85 × 1.37 inches)
Weight	14.9kg (32.8 lb)
Glass	High transparency solar glass 3.2mm (0.13 inches)
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP 65 rated
Cables	Photovoltaic Technology cable 4.0mm ² (0.006 inches ²), 900mm (35.4 inches)
Connector	Original MC4 

TEMPERATURE RATINGS

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C (±2°C)
Temperature Coefficient of P _{max}	-0.40%/°C
Temperature Coefficient of V _{oc}	-0.30%/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	0.023%/°C

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1000V DC(IEC)/600V DC(UL)
Max Series Fuse Rating	10A

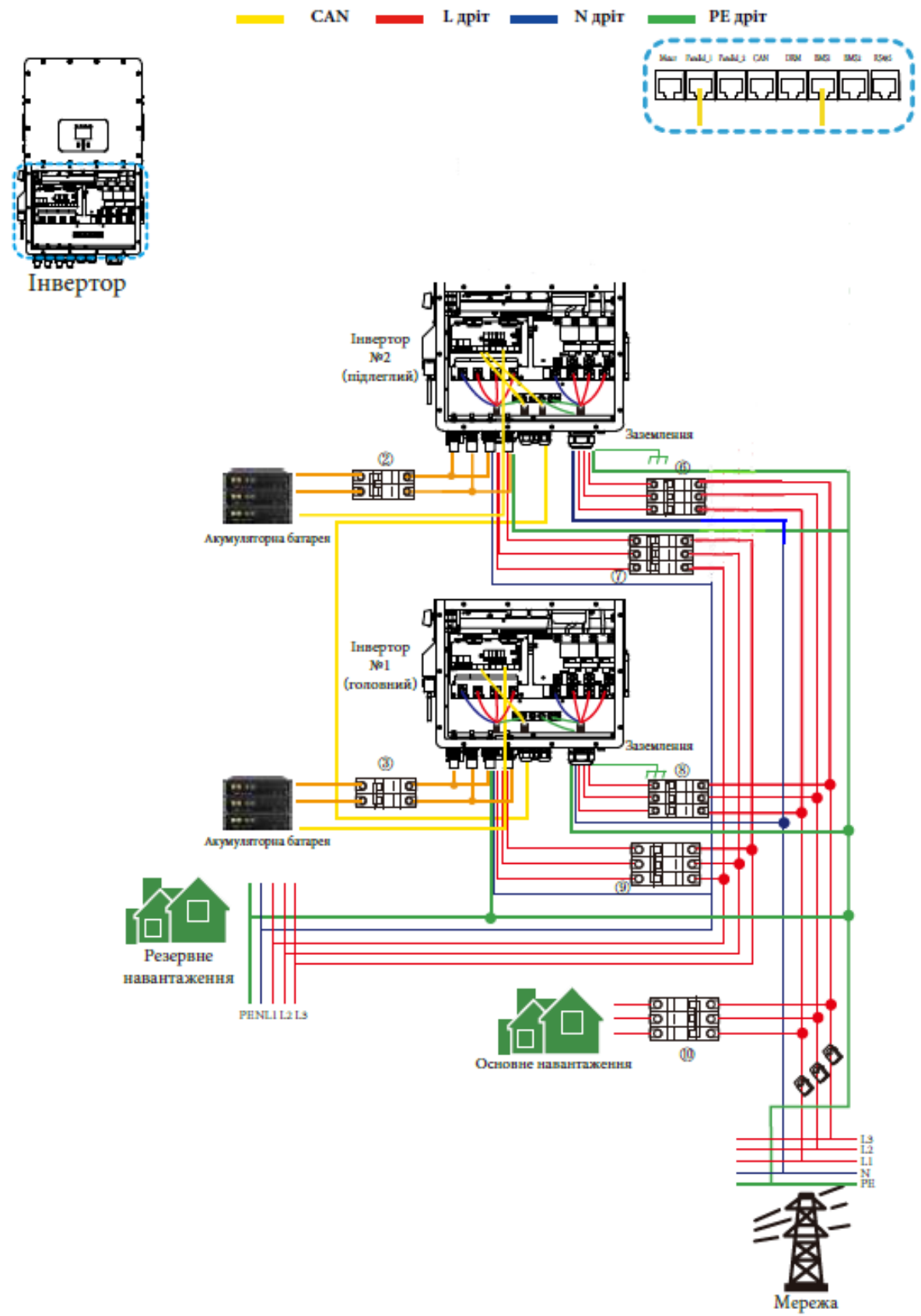
WARRANTY

10 year Product Workmanship Warranty
25 year Linear Power Warranty
(Please refer to product warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

Modules per box: 29 pieces
Modules per 40' container: 812 pieces

Додаток Б



Додаток В

Technical Data

www.deyeess.com

Model		B05-G	
Main Parameter			
Cell Chemistry		LiFePO4	
Module Energy(kWh)		5.12	
Module Nominal Voltage (V)		51.2	
Module Capacity(Ah)		100	
Battery Module Qty in series. (Optional)		4 (Min)	8 (Standard US Cluster)
			12 (Standard EU Cluster)
System Nominal Voltage (V)		204.8	409.6
System Operating Voltage(V)		180~230	359~460
System Energy (kWh)		20.48	40.96
System Usable Energy(kWh)		18.5	36.86
Charge/Discharge Current(A)	Recommend	50	
	Max	100	
	Peak (2 mins, 25°C)	125	
Working Temperature(°C)		Charge: 0~50/Discharge: -20~55	
Status Indicator		Yellow: Battery High Voltage Power On Red: Battery System Alarm	
Communication Port		CAN2.0/RS485	
Humidity		5~85%RH	
Altitude		≤2000m	
IP Rating of Enclosure		IP20	
Dimension (W/D/H,mm)		580*590*1615	580*590*2200
Weight Approximate(kg)		258	434
			628
Installation Location		Rack Mounting	
Storage Temperature(°C)		0~35	
Recommend Depth of Discharge		90%	
Cycle Life		25±2°C, 0.5C/0.5C, EOL70%≥6000	
Warranty		10 years	
Certification		CE/IEC62619/UL1973/UL9540A/UN38.3	

- 1 DC Usable Energy, test conditions: 90% DOD, 0.5C charge & discharge at 25°C. System usable energy may vary due to system configuration parameters.
- 2 The current is affected by temperature and SOC.
- 3 The warranty is due whichever reached first of warranty period or life cycle power.