

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____ Петро ПЛЄШКОВ
“ ___ “ _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему:
«Дослідження та оцінка ефективності впровадження
гібридної фотоелектричної системи електропостачання для
промислового об’єкта»

Виконав здобувач вищої освіти
_____ *II* курсу, групи *ЕЕ-24М*
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,

_____ Андрій МОРГУНОВ
« _____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Катерина ПЕТРОВА
« _____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____Петро ПЛЄШКОВ

«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Моргунова Андрія Дмитровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Дослідження та оцінка ефективності впровадження гібридної фотоелектричної системи електропостачання для промислового об'єкта
Research and evaluation of the effectiveness of implementing a hybrid photovoltaic power supply system for an industrial facility

2. Керівник роботи Петрова Катерина Григорівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 15.12.2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Мета кваліфікаційної роботи полягає у дослідженні, розробці, комплексній оцінці технічної та економічної ефективності впровадження гібридної фотоелектричної системи електропостачання, інтегрованої в існуючу мережу промислового об'єкта. Досягнення поставленої мети було забезпечене вирішенням завдань: 1) проаналізувати та розрахувати електричні навантаження промислового об'єкта з визначенням пікових значень та річного профілю споживання; 2) виконати розрахунок та вибір основного електротехнічного обладнання (кабелів, трансформатора, комутаційних апаратів) для забезпечення надійного електропостачання; 3) розробити концептуальний проєкт сонячної електростанції, включаючи вибір типу та кількості фотомодулів, інверторного обладнання та системи кріплення; 4) провести моделювання річної генерації ФЕС за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (PVsyst) та порівняти її з фактичним споживанням; 5) визначити капітальні та експлуатаційні витрати на впровадження системи та провести економічну оцінку ефективності проєкту, розрахувавши термін окупності та чисту поточну вартість (NPV).

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. Савеленко І.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	15.09.2025 р.	
2	Актуальні вектори розвитку систем електропостачання	29.09.2025 р.	
3	Аналіз цільового промислового об'єкта для впровадження альтернативного електрозабезпечення	13.10.2025 р.	
4	Оцінка ефективності та проектування гібридної фотоелектричної системи	27.10.2025 р.	
5	Розроблення стартап-проекту впровадження гібридної фотоелектричної системи	10.11.2025 р.	
6	Висновки, список використаних джерел	24.11.2025 р.	
7	Оформлення додатків	02.12.2025 р.	
8	Оформлення презентаційної частини КР	05.12.2025 р.	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис керівника

Катерина ПЕТРОВА

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача

Андрій МОРГУНОВ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 102 с., 49 рис., 30 табл., 23 джерела

Моргунов А.Д. Дослідження та оцінка ефективності впровадження гібридної фотоелектричної системи електропостачання для промислового об'єкта. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньої програми «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет; Кропивницький, 2025 р.

Метою роботи є дослідження, розробка та комплексна оцінка технічної та економічної ефективності впровадження гібридної фотоелектричної системи електропостачання, інтегрованої в існуючу мережу промислового об'єкта.

У роботі розкрито теоретичні засади впровадження гібридних фотоелектричних систем як ключового чинника підвищення енергетичної стійкості та зниження експлуатаційних витрат промислових споживачів. Проаналізовано сучасні методичні підходи до проектування сонячних електростанцій та сформовано алгоритм вибору і узгодження обладнання з урахуванням місцевих умов. На прикладі промислового об'єкта проведено профілювання електроспоживання, розроблено та змодельовано конфігурацію СЕС загальною потужністю 147,7 кВт, а також здійснено комплексну техніко-економічну оцінку проекту. Отримані результати підтвердили високу інвестиційну привабливість рішення (термін окупності 3,42 роки) і можуть бути використані для обґрунтування капітальних інвестицій та реалізації програм енергозабезпечення на підприємствах.

**ГІБРИДНА ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА, ПРОМИСЛОВИЙ ОБ'ЄКТ,
ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕКОНОМІЧНА ОКУПНІСТЬ,
РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ**

ABSTRACT

Qualification work: 102 p.; 49 fig.; 30 tables; 23 sources

Morhunov A.D. Research and evaluation of the effectiveness of implementing a hybrid photovoltaic power supply system for an industrial facility. - Manuscript.

Qualification Paper for the second (Master's) level of higher education in specialty 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", educational program "Electrical Power Consumption Systems". – Central Ukrainian National Technical University; Kropyvnytskyi, 2025.

The goal of the work is the research, development, and comprehensive evaluation of the technical and economic efficiency of implementing a hybrid photovoltaic power supply system integrated into the existing grid of an industrial facility.

The paper unveils the theoretical foundations for the implementation of hybrid photovoltaic systems as a key factor in increasing the energy resilience and reducing the operating costs of industrial consumers. Modern methodological approaches to the design of solar power plants are analyzed, and an algorithm for equipment selection and coordination, considering local conditions, is formulated. Based on the example of an industrial facility, electricity consumption profiling was performed, a solar power plant (SPP) configuration with a total capacity of 147.7 kW was developed and modeled, and a comprehensive technical and economic evaluation of the project was conducted. The obtained results confirmed the high investment attractiveness of the solution (payback period of 3.42 years) and can be used to justify capital investments and implement energy supply programs at enterprises.

HYBRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM, INDUSTRIAL FACILITY,
ENERGY EFFICIENCY, ECONOMIC PAYBACK, DISTRIBUTED
GENERATION

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АКТУАЛЬНІ ВЕКТОРИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	12
1.1. Архітектоніка та ключові ланки сучасних енергосистем.....	12
1.2. Концепція гібридних систем та розподілена генерація як шлях до ефективності	13
1.3. Загальні вектори розвитку ВДЕ в Україні та світі.....	17
1.4. Архітектура та експлуатаційні особливості гібридних систем електропостачання з ВДЕ.....	25
Висновки до розділу 1	29
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЦІЛЬОВОГО ПРОМИСЛОВОГО ОБ'ЄКТА ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	31
2.1. Обґрунтування вибору промислового підприємства та оцінка площ дахів.....	31
2.2. Визначення розрахункових показників електроспоживання об'єкта	32
2.3. Вибір параметрів електричних кабельних ліній.....	35
2.4. Вибір основного обладнання: трансформатора та комутаційних апаратів.....	39
2.5. Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ) та аналіз електроспоживання.....	41
Висновки до розділу 2.....	45
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ГІБРИДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ	47
3.1 Розробка концептуального проєкту сонячної електростанції (СЕС) для промислового об'єкта.....	47

	7
3.2. Моделювання структурної схеми підключення СЕС	65
3.3. Аналіз річної генерації фотоелектричної системи.....	67
3.4. Розрахунок капітальних витрат на впровадження фотоелектричної системи	75
3.5. Визначення показників інвестиційної привабливості та терміну окупності СЕС.....	78
Висновки до розділу 3	81
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	83
4.1. Мета та завдання реалізації досліджуваної сонячної електростанції (СЕС).....	83
4.2. Технологічний аудит концепції проєкту.....	84
4.3. Аналіз ринкових перспектив запуску стартап-проєкту.....	85
4.4. Формування ринкової стратегії проєкту.....	89
4.5. Розробка програми стартап-проєкту.....	90
Висновки до розділу 4	91
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95
ДОДАТКИ.....	98
ДОДАТОК А. Охорона праці.....	99

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВДЕ	– відновлювані джерела енергії
ГСЕ	– гібридні системи електропостачання
ДБН	– державні будівельні норми
ЕС	– енергетична система
КЗ	– короткого замикання
КПЕ	– ключові показники ефективності
ЛЕП	– лінії електропередачі
ОЕС	– Об'єднана енергетична система
ПЛ	– повітряна лінія
СНЕ	– система накопичення енергії
ФЕМ	– фотоелектричний модуль
ЯЕЕ	– якість електроенергії

ВСТУП

В умовах глобальних енергетичних викликів та необхідності підвищення енергетичної стійкості національної економіки, дослідження та практичне впровадження гібридних фотоелектричних систем (ФЕС) для промислових об'єктів набуває критичного значення. Актуальність теми обумовлена низкою взаємопов'язаних факторів:

1. Економічна доцільність та волатильність ринку. Безперервне зростання цін на традиційні енергоносії та непередбачуваність тарифної політики створюють значні ризики для фінансової стабільності промислових підприємств. Власна генерація, забезпечена ФЕС, дозволяє знизити операційні витрати на електроенергію, хеджувати ризики коливань цін та підвищити конкурентоспроможність продукції.

2. Підвищення енергетичної безпеки та стійкості. В контексті посилення загроз для централізованої енергетичної інфраструктури, розподілена генерація виступає ключовим елементом підвищення живучості системи електропостачання. Гібридні системи, здатні працювати в автономному режимі, гарантують безперервність виробничих процесів навіть під час аварійних чи планових відключень у зовнішній мережі.

3. Екологічні вимоги та декарбонізація. Україна взяла на себе зобов'язання щодо зниження викидів парникових газів та збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Впровадження ФЕС на промислових об'єктах є прямим кроком до декарбонізації виробництва, покращення екологічного іміджу підприємства та дотримання міжнародних екологічних стандартів.

4. Технологічний розвиток. Постійне зниження вартості фотоелектричних модулів та зростання ефективності інверторного обладнання та систем управління (MPPT-трекери, Smart Grids) робить інтеграцію сонячної генерації технологічно доступною та економічно вигідною навіть для великих промислових споживачів.

Таким чином, комплексне дослідження, що включає технічне

проектування, моделювання генерації та фінансово-економічну оцінку гібридної ФЕС, є науково обґрунтованою відповіддю на актуальні виклики в енергетичному секторі промисловості.

Метою роботи є дослідження, розробка та комплексна оцінка технічної, а також економічної ефективності впровадження гібридної фотоелектричної системи електропостачання, інтегрованої в існуючу мережу промислового об'єкта.

Об'єкт дослідження: система електропостачання промислового підприємства, що використовує комбіновані джерела енергії.

Предмет дослідження: методи та моделі розрахунку, проектування і техніко-економічного обґрунтування параметрів гібридної фотоелектричної системи та її впливу на показники ефективності енергоспоживання промислового об'єкта.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Проаналізувати та розрахувати електричні навантаження промислового об'єкта з визначенням пікових значень та річного профілю споживання.

2. Виконати розрахунок та вибір основного електротехнічного обладнання (кабелів, трансформатора, комутаційних апаратів) для забезпечення надійного електропостачання.

3. Розробити концептуальний проєкт сонячної електростанції, включаючи вибір типу та кількості фотомодулів, інверторного обладнання та системи кріплення.

4. Провести моделювання річної генерації ФЕС за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (PVsyst) та порівняти її з фактичним споживанням.

5. Визначити капітальні та експлуатаційні витрати на впровадження системи та провести економічну оцінку ефективності проєкту, розрахувавши термін окупності та чисту поточну вартість (NPV).

Результати проведеного дослідження мають значне практичне значення

і можуть бути використані як інструментальна база для впровадження рішень у сфері розподіленої енергетики.

РОЗДІЛ 1

АКТУАЛЬНІ ВЕКТОРИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1. Архітектоніка та ключові ланки сучасних енергосистем

Енергетична інфраструктура України являє собою складноструктуровану систему, що охоплює генеруючі потужності — атомні (АЕС), теплові (ТЕС/ТЕЦ), гідроелектростанції (ГЕС/ГАЕС), а також об'єкти, що використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ), як-от вітрові та сонячні електростанції. Ця інтегрована мережа забезпечує паралельну роботу різних джерел живлення та ефективний розподіл електричної енергії між усіма регіонами країни.

Ключовими функціональними елементами системи електропостачання є:

- Генеруючі потужності (електростанції): Виробництво електроенергії.
- Підвищувальні підстанції: збільшують рівень напруги для передачі енергії магістральними лініями електропередачі (ЛЕП), мінімізуючи втрати.
- Розподільні мережі та знижувальні підстанції: знижують напругу до рівнів, придатних для кінцевих споживачів (промисловість, комунальний сектор, населення).

Енергетична система (ЕС) — це сукупність електричних станцій, теплових установок та мереж, які пов'язані спільним режимом роботи і керуються централізовано для безперервного постачання споживачів. Об'єднана енергетична система (ОЕС) — це об'єднання декількох ЕС, що функціонують у спільному режимі та координуються диспетчерським управлінням.

Проектування та експлуатація сучасних систем електропостачання, особливо для промислових об'єктів зі специфічними потребами, вимагає

комплексного підходу. Основні принципи проектування спрямовані на підвищення надійності електропостачання, збільшення енергоефективності та, як наслідок, оптимізацію економічних показників об'єкта.

Випадки, коли централізоване електропостачання є недоцільним або технічно складним, включають:

- Віддаленість населеного пункту або промислового об'єкта від магістральних мереж.
- Висока вартість будівництва протяжних ліній електропередачі.
- Складні географічні умови (наприклад, гірська місцевість, річки).

Саме в таких умовах підвищується актуальність автономних або гібридних систем генерації.

1.2. Концепція гібридних систем та розподілена генерація як шлях до ефективності

Енергетичний баланс України традиційно ґрунтується на потужностях атомної та теплової генерації, які історично забезпечували найбільшу частку виробництва електроенергії.

- Атомна енергетика (АЕС): На сьогодні є найбільшим джерелом електроенергії в країні, виробляючи понад половину загального обсягу. Однак, АЕС характеризуються низькою маневреністю: вони повільно змінюють потужність, що ускладнює їхнє використання для балансування пікових навантажень увечері та провалів споживання вночі.

- Теплова енергетика (ТЕС): Залишається критично важливою для балансування енергосистеми. ТЕС оперативно нарощують потужність під час пікових навантажень, компенсуючи обмежену гнучкість АЕС та нестабільність ВДЕ. Внаслідок військових дій значна частина потужностей ТЕС та ГЕС була пошкоджена, що посилює дефіцит маневрової потужності та збільшило навантаження на систему.

- Гідроенергетика (ГЕС/ГАЕС): Відіграє ключову роль у забезпеченні стійкості ОЕС, оскільки може миттєво включатися в роботу,

незалежно від погодних умов та інтегрований із системою управління водними ресурсами.

Сучасний світ стикається з гострою проблемою, спричиненою переважним використанням викопного палива (зокрема, вуглецю) для генерації енергії — це «парниковий ефект», що веде до глобального потепління та зміни клімату.

Для протидії цим загрозам відновлювані джерела енергії (ВДЕ) набувають стратегічного значення. До ВДЕ належать: сонячна, вітрова, геотермальна, океанічна енергія та енергія біомаси [1].

Основна перевага ВДЕ — мінімальний негативний вплив на довкілля (відсутність викидів парникових газів).

Однак, існують і суттєві недоліки, які є ключовими для теми магістерської роботи:

- Сонячна енергетика: Залежність від погодних умов, інтенсивності сонячної радіації, пори доби та сезону. Це призводить до нестабільності генерації.
- Вітрова енергетика: Непостійність роботи, що прямо залежить від швидкості вітру. Також можуть виникати проблеми, пов'язані з впливом на птахів та шум.

Поєднання різних типів генерації, зокрема ВДЕ з традиційними джерелами або системами накопичення енергії, є актуальним шляхом до забезпечення надійності та економічної ефективності електропостачання, особливо для промислових об'єктів. Це обґрунтовує необхідність дослідження гібридних фотоелектричних систем.

Використання викопного палива як основи енергобалансу породжує глобальні проблеми, пов'язані з непоновлюваністю ресурсів та кліматичними змінами через значні викиди парникових газів (CO₂). Це вимагає пошуку стійких альтернатив.

Сонячна енергетика (ФЕС), попри свою екологічність, має ключові обмеження, які ускладнюють її інтеграцію в енергосистеми промислових об'єктів:

- Технічна нестабільність: Генерація непередбачувана і залежить від метеорологічних чинників (хмарність, інтенсивність інсоляції, сезонність).
- Економічні бар'єри: Вимагає значних початкових капіталовкладень (CAPEX), що впливає на термін окупності проєкту.

Ці недоліки обумовлюють необхідність впровадження систем, здатних нівелювати цю нестабільність.

Сучасна енергетика спрямована на досягнення високої енергетичної ефективності, яка реалізується через оптимізацію режимів роботи обладнання та мінімізацію втрат у мережі.

Великий потенціал для підвищення надійності, маневреності та економічності електропостачання промислових споживачів мають гібридні системи електропостачання (ГСЕ).

Гібридна фотоелектрична система — це інтегрований комплекс, який поєднує сонячні фотоелектричні модулі (ВДЕ) з традиційним джерелом (мережею/генератором) та, часто, з системою накопичення енергії (СНЕ). Таке поєднання забезпечує синергічний ефект, гарантуючи стабільне живлення, навіть коли сонячна генерація відсутня або недостатня.

Розвиток ГСЕ є частиною глобального тренду до розподіленої генерації, де промисловий об'єкт стає прод'юсером (виробником і споживачем одночасно). Це дозволяє:

- Працювати на власній електроенергії, зменшуючи залежність від зовнішніх мереж.
- Використовувати чисті технології, що мінімізує екологічний вплив.



Рисунок 1.1 — Типова схема компонентів гібридної фотоелектричної системи з автономним режимом роботи (на прикладі ФЕС з акумуляторним накопичувачем для промислового об'єкта)

Сучасні системи електропостачання, особливо з інтегрованою розподіленою генерацією, повинні демонструвати високу ефективність за низкою ключових показників:

1. Надійність та безперерійність (резервування):

- використання ГСЕ забезпечує безперерійну подачу енергії на підприємство, мінімізуючи ризики зупинки виробництва через аварії в зовнішній мережі;

- регулярний моніторинг та дистанційне керування дозволяють оперативно реагувати на пошкодження, скорочуючи час простою.

2. Якість електроенергії (ЯЕЕ) та стандартизація:

- ЯЕ (стабілізація частоти та напруги) повинна відповідати встановленим нормам і стандартам (зокрема, для інтеграції в європейський енергоринок);

- Модульність конструкції та стандартизація обладнання спрощують проєктування, обслуговування та модернізацію системи.

3. Економічна ефективність. Ключові показники ефективності (КПЕ), які необхідно оптимізувати при впровадженні ГСЕ для промисловості, включають:

- LCOE (Levelized Cost of Electricity): усереднена вартість генерації. Оптимізація режиму роботи ГСЕ спрямована на зниження LCOE, що є головним економічним показником;

- NPV (Net Present Value): чиста приведена вартість інвестиції, що визначає загальну рентабельність проекту;

- SFR (Solar Fraction): частка енергії, що покривається ФЕС, підвищення якої скорочує витрати на купівлю мережевої електроенергії.

Гнучкість системи, що включає здатність швидко адаптуватися до змін режимів навантаження (особливо на промислових об'єктах) та ефективно управлятися новітніми системами зв'язку, є критичною для досягнення максимальної економічної ефективності.

1.3. Загальні вектори ВДЕ в Україні та світі

Основні характеристики ВДЕ — це їхня нескінченність та екологічна безпека. До них відносяться сонячна, вітрова, гідро-, геотермальна, океанічна енергія та енергія біомаси.

Ключові переваги масового впровадження ВДЕ:

- Екологічний пріоритет: збереження вичерпних природних ресурсів та зменшення викидів шкідливих речовин (CO_2 , NO_x , SO_x), що є основним завданням у боротьбі з кліматичними змінами.

- Енергетична незалежність: зменшення залежності від імпорту традиційних енергоносіїв, що є критично важливим для України в умовах військової агресії.

- Економічна вигода: для кінцевого споживача (включно з промисловими об'єктами) використання власної генерації (наприклад, сонячної) зменшує рахунки за електроенергію та мінімізує збитки від

аварійних чи планових відключень (збереження продукції, запобігання зносу обладнання від частих пусків/зупинок).

Стратегічна роль накопичення енергії: розвиток технологій накопичення енергії (СНЕ) є ключовим у цій галузі, оскільки СНЕ компенсує нерівномірність генерації ВДЕ (сонця, вітру) і забезпечує стабілізацію частоти та напруги в локальній мережі.

Сонячна енергетика залишається найбільш динамічним сегментом ВДЕ. Згідно з прогнозами (наприклад, ІЕА), світова фотоелектрична потужність продовжить стрімко зростати, демонструючи подвоєння показників у найближчі роки. Загальна встановлена потужність ВДЕ зростає до кінця 2023 року приблизно на 507 ГВт. Китай залишається світовим лідером за темпами розгортання нових потужностей, значно випереджаючи ЄС та США [2].

Технічні фактори, що впливають на ефективність ФЕС:

1. Якість матеріалів:

– кремній (основний напівпровідниковий матеріал для фотоелементів, його якість прямо пропорційна ефективності перетворення сонячного світла в постійний струм);

– захисні елементи (міцне скло та якісна рама забезпечують механічну стійкість до зовнішніх впливів (сніг, вітер, транспортування)).

2. Температурний режим (ефективність сонячних панелей знижується зі зростанням їхньої робочої температури, оскільки нагрівання призводить до зниження вихідної напруги фотоелектричної системи).

3. Експлуатаційні фактори [3] (очищення панелей від забруднень (бруд, пилу), правильний кут нахилу (оптимізація для місцевої широти) та уникнення затінення мають вирішальне значення для максимального вироблення енергії).

4. Інвертор (є ключовим компонентом ФЕС, що перетворює постійний струм (DC), згенерований панелями, на змінний струм (AC), необхідний для живлення промислових споживачів та передачі в мережу).

Ефективність сонячної батареї — це відношення кількості виробленої електричної енергії до кількості сонячної енергії, що потрапила на її поверхню.

Використання енергії вітру є однією із найпопулярніших та найдоступніших способів отримання відновлювальної енергії світу. Вона є однією з найдешевших видів генерації в країнах ЄС, де лідерами є такі країни, як Данія (забезпечує до половини електроенергії), Німеччина та Швеція.

Таблиця 1.6 – Роль ВДЕ для країн світу

Країна (ЄС, Приклад)	Роль ВЕС	Встановлена потужність, ГВт
Данія (ЄС)	Ключова частка (до 50% генерації електроенергії)	Висока (лідери за проникненням ВЕС)
Швеція (ЄС)	Лідер за часткою ВДЕ у загальному енергоспоживанні	Висока
Німеччина (ЄС)	Найбільша встановлена потужність ВЕС у Європі	Дуже висока (понад 60 ГВт)
Іспанія (ЄС)	Значна частка у загальній генерації; лідер у Південній Європі	Висока (сильна континентальна ВЕС)
Норвегія	Активний розвиток ВЕС, попри традиційну гідроенергетику	Значна
Китай	Світовий лідер за встановленою потужністю ВДЕ та ВЕС	Найвища (понад 300 ГВт)
США	Другий світовий ринок ВЕС, ключове джерело в багатьох штатах	Дуже висока

Ситуація в Україні:

- На початок повномасштабного вторгнення встановлена потужність ВЕС в Україні складала 1.67 ГВт [4].

- Значна частина цих потужностей була втрачена або пошкоджена внаслідок бойових дій та окупації (Запорізька, Миколаївська області), що призвело до дефіциту генерації.

- Переваги ВЕС для промисловості: вища тривалість експлуатації порівняно з ФЕС та стабільна вартість енергії. Недолік: головна залежність від характеристик вітру (швидкість та сила), що вимагає компенсації за допомогою гібридизації.

Геотермальна енергетика використовує тепло Землі для виробництва електроенергії та забезпечення теплового контролю (опалення/охолодження) промислових об'єктів та домогосподарств.

- Переваги: стабільність виробництва, незалежність від погоди та стійкість тарифів на енергію.

- Світова статистика [5]: орієнтовне значення встановленої потужності геотермальної ЕЕ на кінець 2023 року сягала 16 335 МВт. Лідерами є США (≈ 3900 МВт), Індонезія та Філіппіни.

- Україна: Наразі геотермальна енергетика не набула масового поширення, переважно через високі початкові інвестиції та необхідність подальших досліджень. Однак, вона має значний потенціал для агропромислового сектору (обігрів теплиць).

Стрімкий розвиток та здешевлення компонентів сонячної та вітрової енергетики, а також підтримка на державному рівні (гранти, пільги, зменшення бар'єрів) роблять ВДЕ надзвичайно перспективним напрямком для підвищення енергетичної стійкості підприємств. Використання сучасних систем моніторингу та управління забезпечує оптимальне функціонування таких об'єктів, а гібридизація (наприклад, ФЕС + мережа + СНЕ) дозволяє нівелювати нестабільність ВДЕ та гарантувати безперебійне живлення.

Сонячна енергетика користується особливою увагою у світовій тенденції до впровадження альтернативних джерел, демонструючи високі темпи зростання.

Фотоелектрична система (ФЕС) – це технічний комплекс, призначений для перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію. Основні компоненти ФЕС:

1. Фотопанелі (Сонячні модулі): перетворюють сонячне світло (потік фотонів) на постійний струм (DC). Цей процес відбувається завдяки фотоелектричному ефекту у напівпровідниковому матеріалі (найчастіше кремнії), який створює електричне поле.

2. Інвертор: пристрій, що перетворює постійний струм (DC), згенерований панелями, на змінний струм (AC), придатний для живлення споживачів (приладів, обладнання промислового об'єкта) та взаємодії з електромережею.

3. Система накопичення енергії (СНЕ/Акумуляторні батареї): Необхідна для автономних та гібридних систем з метою резервування енергії, що особливо важливо для стабільного електропостачання промислових споживачів.

4. Система керування та захисне обладнання: контролери заряду, комутаційні апарати, системи моніторингу та кріплення.

Проектування ФЕС є багатоступінчастим процесом, що починається з розрахунку необхідної потужності. Цей розрахунок ґрунтується на аналізі профілю енергоспоживання об'єкта та оцінці сонячної радіації в місці розташування. Ключові критерії розміщення та монтажу:

- Технічна та пожежна безпека: монтаж повинен відповідати державним будівельним нормам (ДБН) та Правилам електробезпеки.
- Конструкційна надійність: Міцність кріплень, що дозволяє забезпечити захист панелей від екстремальних погодних умов (снігові та вітрові навантаження), що є критичним для довготривалої експлуатації.
- Доступність: Ділянка має бути доступною для монтажних робіт та подальшого технічного обслуговування.

Незважаючи на значні початкові інвестиції (CAPEX), ФЕС характеризуються тривалим терміном служби (25 років і більше) та

забезпечують швидку окупність (часто 4–5 років) за рахунок економії на електроенергії [6]. Виробники надають два основні типи гарантій [7]:

1. Гарантія на матеріали (обладнання): зобов'язання щодо заміни панелей у разі виробничих дефектів.

2. Гарантія на продуктивність: підтверджує, що виробіток енергії не знизиться нижче певного відсотка (наприклад, не менше 80% від номінальної потужності за 25 років експлуатації).

Залежно від цілей використання та архітектури, ФЕС поділяються на три основні види:

1. Мережева СЕС (On-Grid)

- Принцип дії: працює виключно паралельно з централізованою мережею.

- Компоненти: фотопанелі, мережевий інвертор. Не має акумуляторів.

- Ефективність: найбільш ефективна для денного споживання та реалізації надлишків енергії за "зеленим тарифом" (в Україні до недавнього часу це була державна програма стимулювання ВДЕ). Має найкоротший термін окупності.

- Недолік: не функціонує під час відключень зовнішньої мережі.

2. Автономна СЕС (Off-Grid / Резервна)

- Принцип дії: Працює незалежно від централізованої мережі.

- Компоненти: Фотопанелі, автономний інвертор, контролер заряду, акумуляторні батареї.

- Використання: Забезпечення електрикою віддалених об'єктів або об'єктів без доступу до мережі. Акумулятор накопичує енергію для використання вночі або в періоди відсутності сонця.



Рисунок 1.2. Варіант під'єднання мережевої фотоелектричної системи

3. Гібридна СЕС (Hybrid)

- Принцип дії: Поєднує переваги мережевої та автономної систем.
- Компоненти: Фотопанелі, гібридний інвертор, акумуляторні батареї.
- Надійність: Вирізняється високою надійністю, оскільки може використовувати енергію від мережі, ФЕС та акумуляторів. Надлишок енергії може спрямовуватися в мережу або на заряд акумулятора.
- Актуальність для промисловості: Забезпечує стабільність виробництва і енергетичну незалежність підприємства. Хоча має вищу початкову вартість, довгий термін служби та малі експлуатаційні витрати роблять її економічно виправданою.

Україна має значний потенціал для розвитку сонячної енергетики.

- Теоретичний потенціал сонячної енергії в Україні оцінюється в понад 740 млрд кВт·год/рік, а технічно-можливий — у 34,3 млрд кВт·год/рік [8].
- Поточний стан [9]: Станом на квітень 2024 року в Україні функціонує понад 1350 сонячних електростанцій, які складають близько 75% від усіх об'єктів ВДЕ.

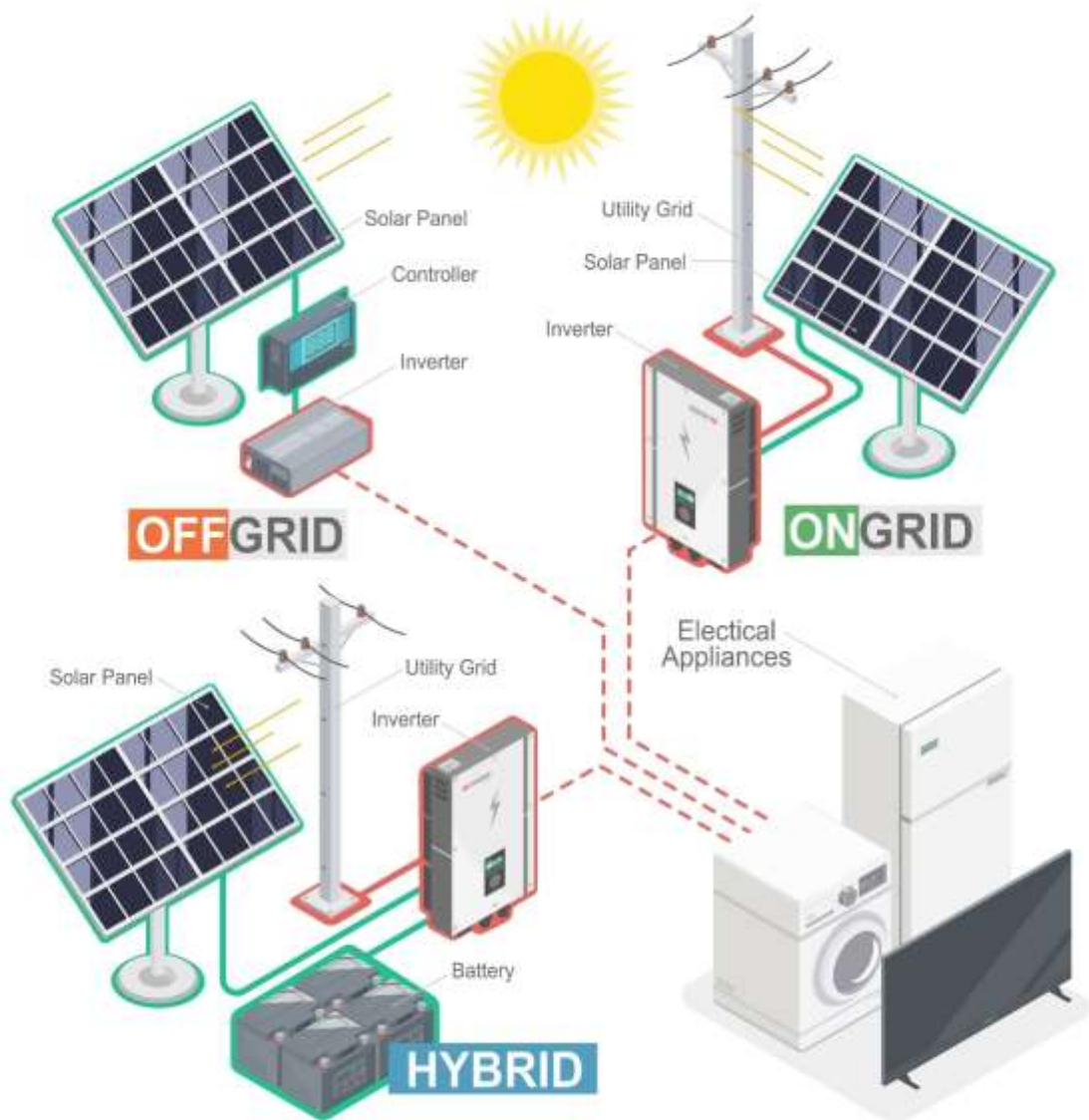


Рисунок 1.3. Структурна схема гібридної фотоелектричної системи

Ключові бар'єри та недоліки:

- Висока вартість початкових інвестицій та потреба у великих площах для розміщення.
- Екологічні виклики: Необхідність обережного поводження з небезпечними хімічними речовинами при виробництві елементів, а також проблема утилізації відпрацьованих панелей [10].

- Обмеження мережі: Застарілість та класична архітектура електричної мережі є значною технічною перешкодою для масового інтегрування ВДЕ.



Рисунок 1.4. Розподіл кількості СЕС за областями України (за даними НКРЕКП).

Отже, підвищення енергоефективності (шляхом зменшення втрат при перетворенні та оптимізації режимів роботи) є основним трендом, який посилює економічну виправданість інвестицій у ФЕС, особливо у формі гібридних систем.

1.4. Архітектура та експлуатаційні особливості гібридних систем електропостачання з ВДЕ

Гібридні системи електропостачання (ГСЕ) — це комплексні енергетичні установки, які інтегрують два або більше джерел генерації (як відновлюваних, так і традиційних) із системами накопичення енергії (СНЕ). Типова архітектура ГСЕ:

- Основні ВДЕ: фотоелектричні (ФЕС) та/або вітрові електростанції (ВЕС).
- Резервні/Балансуючі джерела: дизель-генератори (ДГ) або бензинові генератори.
- Центральний елемент: система накопичення енергії (СНЕ), зазвичай на базі акумуляторних батарей.
- Керуючий елемент: гібридний інвертор та інтелектуальна система управління.

Системи накопичення ЕЕ є невіддільною частиною ГСЕ, оскільки вони забезпечують стабілізацію роботи та компенсацію нерівномірності генерації від ВДЕ (сонця, вітру). СНЕ дозволяє:

- Акумулювати надлишкову енергію в періоди високої генерації.
- Видавати енергію під час пікового споживання, вночі, або у випадках аварійних/планових відключень центральної мережі, гарантуючи безперебійність живлення промислового обладнання.

Типова архітектура гібридної ФЕС із системою накопичення енергії (СНЕ) та резервним генератором наведено на рис.1.5.

На рис. 1.5 можна побачити ключові компоненти та взаємозв'язки:

- Solar PV Array (масив сонячних фотоелектричних панелей) – генерує енергію.
- Hybrid Inverter / Controller (гібридний інвертор / Контролер) – керує потоками енергії, перетворює струм.
- Battery Energy Storage System (BESS) (система накопичення енергії на акумуляторах) – зберігає надлишкову енергію.
- Backup Diesel Generator (резервний дизельний генератор) – надає додаткову потужність за потреби.
- Utility Grid / External Network (зовнішня мережа) – забезпечує підключення до централізованого електропостачання.
- Industrial Facility Load (навантаження промислового об'єкта) – кінцевий споживач електроенергії.



Рисунок 1.5. Типова архітектура гібридної ФЕС із системою накопичення енергії (СНЕ) та резервним генератором

Надійність електропостачання є пріоритетом при проектуванні ГСЕ для промислових об'єктів. Це досягається за допомогою багаторівневого резервування:

1. Джерела безперебійного живлення (ДБЖ): Використовуються для миттєвої подачі живлення критичному обладнанню при зникненні основної мережі. ДБЖ підтримує роботу обладнання до моменту запуску більш потужних резервних джерел (наприклад, ДГ).

2. Резервні генератори (Дизельні/Бензинові): Встановлюються як холодний резерв. Вони активуються, коли ВДЕ не можуть забезпечити необхідну потужність (наприклад, тривала хмарність або безвітряна погода). Це поєднання є високоефективним, оскільки ДГ працює лише тоді, коли це абсолютно необхідно, що знижує експлуатаційні витрати та викиди.

Одним із головних завдань при експлуатації ГСЕ є забезпечення високої якості електроенергії (ЯЕ), що є сукупністю параметрів (частота, напруга,

синусоїдальність), які повинні відповідати встановленим стандартам [11].

Ключові аспекти ЯЕ в ГСЕ:

- Стабільність параметрів: Завдяки інтелектуальним системам управління та гібридним інверторам, ГСЕ постійно контролює та підтримує стабільність частоти та напруги, що захищає високочутливе промислове обладнання від пошкоджень та зниження продуктивності.

- Електромагнітна сумісність (ЕМС): Важливо контролювати вплив електромагнітного поля, створюваного обладнанням ГСЕ, на навколишні пристрої, щоб уникнути перешкод і збоїв у роботі.

- Системи моніторингу ЯЕ: Невід'ємна частина сучасних ГСЕ, що дозволяє в режимі реального часу виявляти відхилення від норм.

Оптимізація режиму роботи ГСЕ полягає у виборі найбільш економічно вигідного алгоритму керування (алгоритм енергетичного менеджменту).

Система управління постійно аналізує:

1. Генерацію ВДЕ (прогноз сонця/вітру).
2. Вартість мережевої електроенергії (тарифи).
3. Стан заряду СНЕ.
4. Профіль споживання об'єкта.

Мета — мінімізувати LCOE (усереднену вартість електроенергії) шляхом максимально ефективного використання безкоштовної енергії ВДЕ та мінімізації роботи ДГ або купівлі дорогої мережевої енергії в пікові години.

Хоча початкова вартість обладнання ГСЕ (особливо акумуляторів) залишається відносно високою, вона постійно знижується. Економічна вигода для промислових об'єктів очевидна:

- Скорочення експлуатаційних витрат (ОРЕХ): Зменшення рахунків за електроенергію.

- Мінімізація втрат: Зниження ризиків та збитків від зупинки виробництва через аварійні відключення.

- Екологічна відповідальність: Використання чистої енергії сприяє зниженню вуглецевого сліду підприємства, що є важливим маркетинговим та екологічним фактором.

Ефективність ГСЕ залежить від оптимальної взаємодії всіх компонентів та постійного удосконалення алгоритмів керування СНЕ та генерацією.

Висновки до розділу 1

У рамках аналізу сучасних тенденцій розвитку енергетичних систем встановлено актуальність та стратегічну необхідність переходу до інтегрованих, високоефективних та екологічно чистих рішень, що є критично важливим для забезпечення енергетичної стійкості промислових об'єктів в умовах дефіциту маневрової потужності та зовнішніх загроз. На основі проведеного огляду зроблено такі ключові висновки:

1. Світові та національні енергетичні системи (включно з ОЕС України) демонструють перехід від централізованої моделі до розподіленої генерації, де значну роль відіграють відновлювані джерела енергії (ВДЕ), зокрема сонячна та вітрова енергетика. Це обумовлено глобальним прагненням до декарбонізації та зменшенням залежності від вичерпних викопних палив.

2. Визначено, що основною перешкодою для масового впровадження моно-систем на базі ВДЕ (наприклад, ФЕС) є їхня непередбачуваність та залежність від погодних умов, що призводить до нестабільності генерації та вимагає компенсації. Також встановлено, що, попри значний потенціал (технічно-можливий потенціал енергії сонця в Україні – 34,3 млрд кВт·год/рік), існує бар'єр, пов'язаний із застарілістю електричної мережі для масової інтеграції ВДЕ.

3. Доведено, що ГФЕС, які поєднують ФЕС, мережу та системи накопичення енергії (СНЕ) та/або резервні генератори, є найбільш надійним та економічно виправданим рішенням. Така архітектура забезпечує безперебійність живлення промислового об'єкта, нівелюючи недоліки нестабільної сонячної генерації.

4. Обґрунтовано, що оцінка ефективності ГФЕС для промислового об'єкта повинна базуватися не лише на технічних параметрах (надійність, якість електроенергії – ЯЕ), але й на економічних показниках. До ключових метрик відносяться зниження LCOE (усередненої вартості електроенергії), строк окупності (NPV) та забезпечення високого показника Solar Fraction (SFR).

5. Визначено, що ефективне функціонування ГФЕС залежить від інтелектуального управління та оптимізації режимів роботи. Інтеграція систем моніторингу ЯЕ та сучасних гібридних інверторів є обов'язковою для підтримки стабільності частоти та напруги, що критично важливо для захисту чутливого промислового обладнання.

Таким чином, результати огляду підтверджують, що дослідження та оцінка ефективності впровадження ГФЕС для промислових об'єктів є своєчасним та науково значущим завданням, що закладає основу для подальшого математичного моделювання та розрахунків.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЦІЛЬОВОГО ПРОМИСЛОВОГО ОБ'ЄКТА ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1. Обґрунтування вибору промислового підприємства та оцінка площ дахів

Як цільовий об'єкт для проєктування та оцінки доцільності встановлення сонячної електростанції (СЕС) обрано умовне меблеве виробництво, територіально розташоване у Кіровоградській області. Цей вибір дозволяє провести релевантні розрахунки, враховуючи специфіку енергоспоживання деревообробної та меблевої галузі.

На початковому етапі проведено оцінку потенційно доступних площ дахів на території підприємства, які можуть бути використані для розміщення фотоелектричних модулів. Результати цього розрахунку, що визначають максимальну площу монтажу для кожного структурного підрозділу, наведені нижче. На рис. 2.1. подана принципова схема території виробничого комплексу.

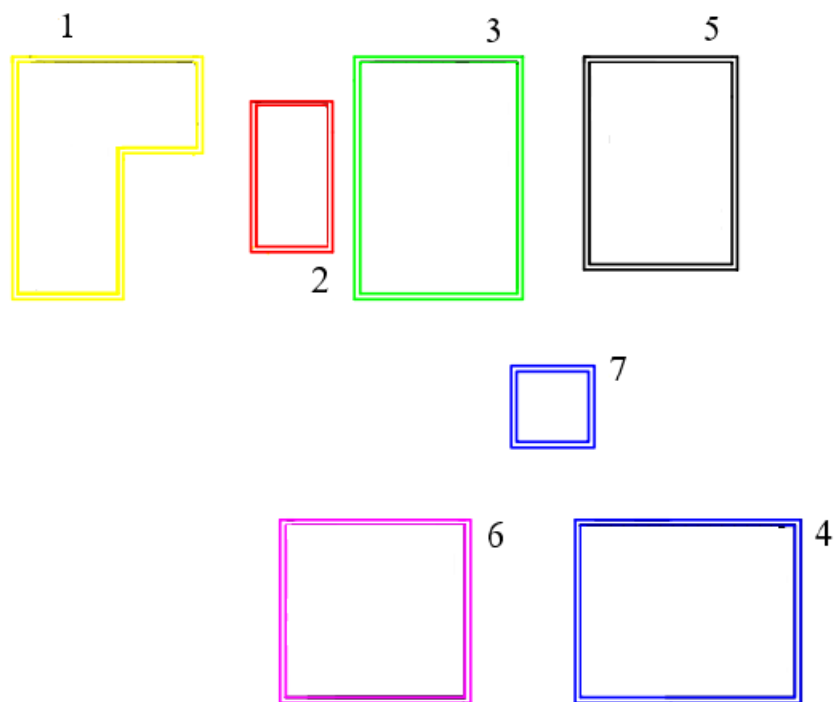


Рисунок 2.1 – Принципова схема території виробничого комплексу

Результати вимірювань загальних площ дахового простору:

- АПК: 145,1 м²
- Котельне відділення: 48,6 м²
- Складські приміщення для первинної сировини: 176,2 м²
- Ділянка сушіння матеріалів (Сушарня): 182 м²
- Основний виробничий цех: 143 м²
- Склад готової продукції: 148 м²
- Трансформаторна підстанція: 25,4 м²

2.2. Визначення розрахункових показників електроспоживання об'єкта

Для коректного вибору та конфігурації гібридної фотоелектричної системи електропостачання критично важливим є точне визначення енергетичних потреб промислового об'єкта. Подальші розрахунки базуються на методичних рекомендаціях, викладених у літературних джерелах [12-13].

Першочерговим завданням є обчислення пікової потужності $P_{\text{пik}}$, яка необхідна для визначення номінальної потужності основного обладнання, зокрема інвертора. Згідно з джерелом [12], добовий графік споживання розбивається на чотири ключові часові інтервали: ранковий, денний, вечірній та нічний.

Для спрощення розрахунків і підвищення їхньої наочності, в якості основних електроспоживачів розглядаються не окремі прилади, а будівлі/цехи, де встановлено відповідне енергоємне обладнання. У табл. 2.1 представлено встановлену та фактично споживану потужність цих об'єктів у різні періоди доби.

На основі агрегованих даних встановлено, що максимальне енергоспоживання зафіксоване впродовж ранкового та денного часових інтервалів і становить $P_{\text{пik}} = 165,0$ кВт.

Наступний етап передбачає обчислення сумарної енергії, яку підприємство споживає за одну годину та за одну добу (див. табл. 2.2).

Таблиця 2.1 – Аналіз розрахункової пікової потужності за періодами доби

Будівля/ Ділянка	Встановлена потужність P_i , кВт	Пікова потужність за період, кВт			
		Ранковий	Денний	Вечірній	Нічний
АПК	25,0	25,0	25,0	2,0	2,0
Котельне відділення	15,0	15,0	15,0	15,0	5,0
Складське приміщення для первинного оброблення сировини	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Основний виробничий цех	90,0	90,0	90,0	90,0	0,0
Ділянка сушіння матеріалів (сушарня)	60,0	0,0	0,0	0,0	60,0
Склад готової продукції	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Сумарна пікова потужність, $P_{пik}$	225,0	165,0	165,0	142,0	102,0

Таблиця 2.2 – Деталізація енергоспоживання впродовж доби

Будівля/Ділянка	Споживана потужність P_i , кВт	Години роботи T_i , год/добу	Енергоспоживання $E_i = P_i \cdot T_i$, кВт·год
АПК	25,0	16,0	400,0
Котельне відділення	15,0	24,0	360,0
Складське приміщення для первинного оброблення сировини	20,0	18,0	360,0
Основний виробничий цех	90,0	16,0	1440,0
Ділянка сушіння матеріалів (сушарня)	60,0	12,0	720,0
Склад готової продукції	15,0	24,0	360,0
СУМАРНЕ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЗА ДОБУ, $E_{доб}$, кВт·год			3392,0

На основі детального аналізу енергетичних потреб, представленого у попередніх розрахунках (табл. 2.2), було визначено загальний обсяг спожитої енергії підприємством за добу, а також у ключові періоди дня. Згідно з агрегованими даними, об'єкт споживає наступну кількість електричної енергії (E – енергія, кВт·год):

- Загальна енергія за добу ($E_{\text{доба}}$): $141,33 \times 24 = 3392$ кВт·год
- Енергія вранці ($E_{\text{ранок}}$): $165 \times 2 = 330$ кВт·год
- Енергія вдень ($E_{\text{день}}$): $165 \times 10 = 1650$ кВт·год
- Енергія ввечері ($E_{\text{вечір}}$): $141 \times 5 = 705$ кВт·год
- Енергія вночі ($E_{\text{ніч}}$): $101 \times 7 = 707$ кВт·год
- Для коректного планування потужності фотоелектричної установки (ФЕУ) та інверторного обладнання доречно визначити $P_{\text{середн}}$ для кожного часового інтервалу.

• Цей показник отримуємо шляхом ділення сумарної енергії, спожитої за період, на відповідну тривалість цього періоду в годинах:

$$P_{\text{середня,1год}} = \frac{E_{\text{періоду}}}{T_{\text{періоду}}} \quad (2.1)$$

Визначені часові інтервали:

- Ранок: 2 години
- День: 10 годин
- Вечір: 5 годин
- Ніч: 7 годин

Підсумкові результати розрахунків енергоспоживання:

1. Максимальна пікова потужність ($P_{\text{пик}}$), необхідна для вибору інвертора: 165 кВт.

2. Добове енергоспоживання об'єкта ($E_{\text{доба}}$): 3640 кВт·год.

Ці розрахункові дані є підґрунтям для подальшого визначення необхідної потужності та конфігурації гібридної фотоелектричної системи.

2.3. Вибір параметрів електричних кабельних ліній

Цей підрозділ присвячений обґрунтуванню вибору перерізів провідників та марок кабелів, необхідних для приєднання споживачів підприємства до головного розподільного щита (ГРЩ) або майбутньої гібридної системи електропостачання.

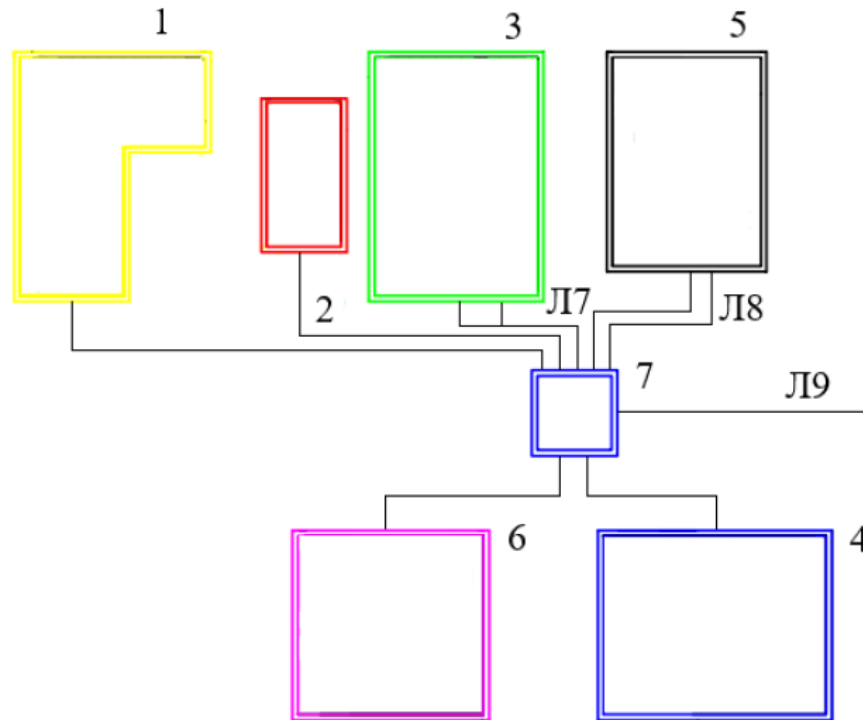


Рисунок 2.2 – Схема території промислового об'єкта з трасами прокладання електричних ліній

На основі схеми прокладання ліній (рис. 2.2) були встановлені фактичні довжини основних кабельних трас (L):

$$L_1 = 70 \text{ м}$$

$$L_2 = 60 \text{ м}$$

$$L_3 = 40 \text{ м}$$

$$L_4 = 25 \text{ м}$$

$$L_5 = 25 \text{ м}$$

$$L_6 = 45 \text{ м}$$

$$L_7 = 70 \text{ м}$$

$$L_8 = 45 \text{ м}$$

$$L_9 = 1000 \text{ м}$$

Далі необхідно розрахувати номінальний струм в кожній лінії, який виникає за умови максимальних навантажень. Для трифазної мережі номінальний струм визначається за відомою потужністю (P) та лінійною напругою (U_л) відповідно до формули:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}}}, \text{ А} \quad (2.2)$$

Отримані значення струмів в лініях заносяться до табл. 2.4.

Вибір оптимального перерізу провідника (Fe) виконується згідно з методом економічної густини струму. Цей метод забезпечує мінімальні сумарні витрати, що включають капітальні вкладення у провідники та експлуатаційні витрати, пов'язані з втратами енергії.

Економічний переріз розраховується за співвідношенням:

$$F_e = \frac{I_{\text{м}}}{j_e}, \text{ мм}^2 \quad (2.3)$$

$I_{\text{м}}$ – струм в лінії за умов максимального навантаження (визначений за формулою (2.2), А);

j_e – обране значення економічної густини струму (А/мм²), яке вибирається відповідно до матеріалу провідника та режиму роботи з табл. 2.3.

Для подальших розрахунків приймаємо обране значення економічної густини струму $j_e = 1.4 \text{ А/мм}^2$.

Отриманий розрахунковий переріз Fe підлягає округленню до найближчого стандартного комерційного перерізу. Відповідно до стандартного перерізу обирається марка кабелю, а результати фіксуються у табл. 2.4.

Після попереднього вибору провідників за економічною густиною струму, необхідно обов'язково виконати перевірку на відповідність допустимим втратам

напруги (ΔU). Ця перевірка є критично важливою для забезпечення якості електроенергії на кінцевих споживачах.

Перевірка виконується згідно з формулою:

$$\Delta U = \frac{k \cdot P \cdot L}{C \cdot S}, \quad (2.4)$$

де ΔU – відносна втрата напруги в провіднику, виражена у відсотках;

P – потужність, підключена до лінії, кВт;

L – довжина провідника від джерела живлення, м;

S – фактичний (стандартний) переріз обраного провідника, мм²;

C – коефіцієнт, що залежить від матеріалу провідника та типу мережі (для трифазної мережі з алюмінієвими провідниками приймається $C = 46$);

k – значення коефіцієнту, що дозволяє врахувати ступінь розподілу навантаження вздовж лінії. Для кабельних ліній (КЛ) $k = 1$, для повітряних ліній (ПЛ) $k = 0.5$.

Підбір перерізу провідників мережі живлення здійснювався з урахуванням допустимого нагріву за тривалого номінального струму та з перевіркою за допустимою втратою напруги. У табл. 2.3 представлено результати розрахунків та вибору кабелів для окремих ділянок мережі (Л1 – Л8), де вказано необхідний розрахунковий переріз (F_e) та обрану стандартну марку кабелю із відповідним фактичним перерізом (S) та тривало допустимим струмом ($I_{доп}$).

Результати цієї перевірки та порівняння з нормативними вимогами фіксуються у табл. 2.3.

Важливим критерієм ефективності електропостачання є забезпечення мінімально допустимих втрат напруги (ΔU) на всіх ділянках мережі. Результати перевірки обраних провідників на втрати напруги представлені у табл. 2.4.

Аналіз даних табл. 2.5 підтверджує, що втрати напруги на всіх ділянках мережі знаходяться в межах нормованих значень і не перевищують 5 %, що є обов'язковою умовою якісного електропостачання. Для ділянки Л9, яка є повітряною лінією (ПЛ) напругою 10 кВ, розрахунок перерізу провідника

здійснювався також за критеріями економічної щільності струму та механічної міцності.

Таблиця 2.3 – Специфікація кабелів розподільчої мережі 0,38 кВ (марка АВВГ)

№ ділянки	Потужність P , кВт	Довжина L , м	Розрахунковий струм I , А	Розрахунковий переріз F_e , мм ²	Номінальний переріз S , мм ²	Допустимий струм $I_{дон}$, А
Л-1	25,0	70,0	37,981	27,131	35,0	114,0
Л-2	15,0	60,0	22,792	16,282	25,0	94,0
Л-3	20,0	40,0	30,392	21,712	25,0	94,0
Л-4	60,0	25,0	91,163	65,114	70,0	165,0
Л-5	90,0	25,0	136,741	97,671	120,0	226,0
Л-6	15,0	45,0	22,797	16,281	25,0	94,0
Л-7	100,0	70,0	151,930	108,522	120,0	226,0
Л-8	100,0	45,0	151,930	108,522	120,0	226,0

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку втрат напруги на лініях 0,38 кВ

№ ділянки	Марка кабелю	Втрати напруги ΔU , %
Л-9	АС 3×25	0,9801
Л-8	АВВГ 4×120	0,813
Л-7	АВВГ 4×120	1,273
Л-6	АВВГ 4×25	0,582
Л-5	АВВГ 4×120	0,412
Л-4	АВВГ 4×70	0,471
Л-3	АВВГ 4×25	0,703
Л-2	АВВГ 4×25	0,782
Л-1	АВВГ 4×35	1,091

На основі економічної щільності струму ($j_e = 1,1$ А/мм²) та розрахункового струму, що живить трансформаторну підстанцію:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_*} = \frac{165}{\sqrt{3} \cdot 10} \approx 9,53 \text{ А}$$

було визначено економічний переріз:

$$F_e = \frac{I}{j_e} = \frac{9,53}{1,1} \approx 8,66 \text{ мм}^2$$

З урахуванням економічного перерізу, а також необхідності дотримання вимог механічної міцності (згідно з ПУЕ становить 25 мм², обирається провід АС-25.

Втрати напруги для Л-9 розраховуються за формулою:

$$\Delta U = \frac{k \cdot P \cdot L}{C \cdot S} = \frac{0,5 \cdot 225 \cdot 1000}{46 \cdot 25} \approx 0,98\%$$

Цей показник також задовольняє вимогам. Результати вибору провідника для Л-9 зведено у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Вибір провідника для ділянки Л9 (ЛЕП 10 кВ)

№ ділянки	Потужність P , кВт	Довжина L , м	Розрахунковий струм I , А	Розрахунковий переріз F_e , мм ²	Марка провідника	Номинальний переріз S , мм ²	Допустимий струм $I_{доп}$, А
Л-9	225,0	1000,0	9,531	8,662	АС-25	25,0	142,1

2.4. Вибір основного обладнання: трансформатора та комутаційних апаратів

Вибір трансформатора для одностанційної підстанції здійснюється на підставі умови, що його номінальна потужність $P_{ном}$ повинна бути не меншою за максимальну розрахункову потужність споживачів $P_{розр}$:

$$P_{ном} \geq P_{розр} = P_{max} \quad (2.5)$$

де P_{max} відповідає піковому навантаженню підприємства. Прийнято максимальне пікове навантаження $P_{пik} = 165$ кВт.

З урахуванням необхідного запасу для трансформаторів 10/0,4 кВ обирається агрегат номінальною потужністю ≥ 200 кВт. Обрано трансформатор

ТМГ-250 (номінальна потужність 250 кВт). У табл. 2.6 подані основні каталожні параметри обраного трансформатора.

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики обраного силового трансформатора

Тип	Номінальна потужність $S_{ном}$, кВА	Номінальна напруга обмоток, кВ	Втрати холостого ходу ΔP_x , кВт	Втрати короткого замикання ΔP_k , кВт	Напруга короткого замикання U_k , %	Струм холостого ходу I_x , %
ТМГ-250	250	ВН: 10, НН: 0.38	0,520	3,70	4,50	1,20

Комутаційні апарати, зокрема автоматичні вимикачі, на стороні напруги 0,4 кВ підбираються відповідно до розрахункового струму з обов'язковою умовою, що номінальний струм апарату повинен бути більшим або рівним $I_{розр}$. У табл. 2.7 наведено вибрані автоматичні вимикачі для захисту ліній та загальних вводів.

Таблиця 2.7 – Специфікація комутаційних апаратів на НН стороні

Умовне позн. на схемі	Значення розр. струму $I_{розр}$, А	Номінальний струм $I_{ном}$, А	Тип автоматичного вимикача
A_8	151,933	160,0	АВ 3003/ЗН 160
A_7	151,933	160,0	АВ 3003/ЗН 160
A_6	22,792	25,0	АВ 3001/ЗН 25
A_5	136,741	160,0	АВ 3003/ЗН 160
A_4	91,161	100,0	АВ 3002/ЗН 100
A_3	30,394	40,0	АВ 3001/ЗН 40
A_2	22,793	25,0	АВ 3001/ЗН 25
A_1	37,982	40,0	АВ 3001/ЗН 40
Головн. авт. 2	417,811	500,0	АВ 3005/ЗН 500
Головн. авт. 1	227,91	250,0	АВ 3003/ЗН 250

2.5. Визначення струмів короткого замикання (КЗ) та аналіз електроспоживання

Для забезпечення надійності та селективності захисту, необхідно розрахувати струми КЗ у найбільш віддаленій точці мережі, що дозволить коректно налаштувати захисні апарати. На рис.2.3. подано для зручності схему визначення струму КЗ.

Активний (R) та індуктивний (X) опори лінії (ділянка Л-9) визначаються шляхом множення питомих опорів на 1 км на фактичну довжину лінії. Результати розрахунку опорів лінії Л9 наведені у табл. 2.8.

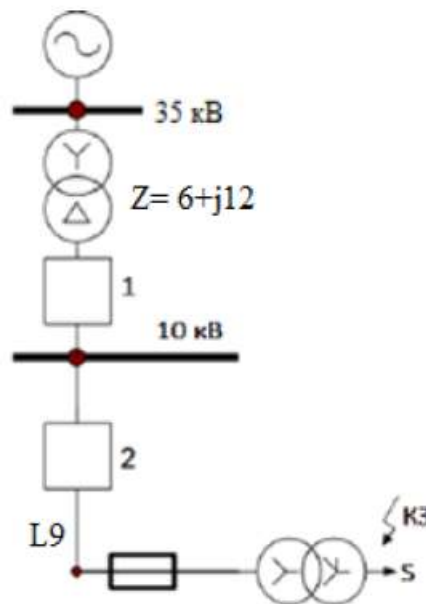


Рисунок 2.3 – Спрощена схема для розрахунку струму трифазного КЗ

Таблиця 2.8 – Розрахунок опорів лінії електропередачі на 1 км (АС-25)

Питомий індуктивний опір $X0$, $\Omega/\text{км}$	Питомий активний опір $R0$, $\Omega/\text{км}$	Загальний індуктивний опір $X_{\text{лінії}}$, Ω	Загальний активний опір $R_{\text{лінії}}$, Ω
0,398	1,38	0,398	1,38

Опори трансформатора визначаються на основі каталожних даних (табл. 2.5):

$$x_T = \frac{U_K \cdot U_{BH}^2}{100 \cdot S_{НОМ.ТР}}, \Omega \quad (2.6)$$

$$r_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{BH}^2}{S_{НОМ.ТР}^2}, \Omega \quad (2.7)$$

Розрахункові значення:

$$x_T \approx 0,018 \text{ кОм} = 18 \text{ Ом}, r_T \approx 0,00592 \text{ кОм} = 5,92 \text{ Ом}.$$

Визначення повного опору до точки КЗ: Сумарні опори розраховуються з урахуванням опору системи:

$$r_{КЗ} = r_C + r_{\text{лінії}} + r_T = 6 + 1,38 + 5,92 = 13,3 \text{ Ом} \quad (2.8)$$

$$x_{КЗ} = x_C + x_{\text{лінії}} + x_T = 12 + 0,398 + 18 = 30,40 \text{ Ом} \quad (2.9)$$

Повний опір:

$$z_{КЗ} = \sqrt{r_{КЗ}^2 + x_{КЗ}^2} = \sqrt{13,3^2 + 30,40^2} \approx 33,18 \text{ Ом} \quad (2.10)$$

Струм при трифазному КЗ:

$$I_{КЗ(3)} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot z_{КЗ}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 33,18} \approx 174,01 \text{ А} \quad (2.11)$$

Струм при двофазному КЗ:

$$I_{КЗ(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{КЗ(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 174,01 \approx 150,70 \text{ А} \quad (2.12)$$

Перевірка налаштування струмової відсічки: значення струму спрацьовування визначається з коефіцієнтом відсічки

$$K_B = 1,1.$$

$$I_{CB} = K_B \cdot I_{K3(2)} = 1,1 \cdot 150,70 \approx 165,77 \text{ A} \quad (2.13)$$

Коефіцієнт чутливості при струмі спрацювання захисту $I_{c.3} = 80 \text{ A}$:

$$k_{ч} = \frac{I_{K3.мін}}{I_{c.3}} = \frac{I_{K3(2)}}{I_{c.3}} = \frac{150,70}{80} \approx 1,88 \quad (2.14)$$

Оскільки $k_{ч} > 1,5$, умова чутливості виконується.

Для оцінки ефективності впровадження гібридної ФЕС необхідно визначити базове річне споживання електричної енергії об'єктом. Річне споживання розраховується як сума добового споживання енергії впродовж року:

$$P_{\text{річне спожив.}} = d \cdot P_{\text{добу}} \quad (2.15)$$

де d — кількість робочих днів/днів у місяці. Результати помісячного розрахунку спожитої електроенергії для різних підрозділів підприємства представлені у вигляді табл.2.9.

Таблиці 2.9. Загальне річне споживання об'єкта

Місяць	Кількість днів	Склад готової продукції	Основний виробничий цех	Ділянка сушіння матеріалів	Складське приміщення для первинного оброблення сировини	Котельне відділення	АПК	Загалом
Грудень	31	11160	47430	13020	14880	8990	9672	105152
Листопад	30	10800	45900	12600	14400	8700	9360	101760
Жовтень	31	11160	47430	13020	14880	8990	9672	105152
Вересень	30	10800	45900	12600	14400	8700	9360	101760
Серпень	31	11160	47430	13020	14880	8990	9672	105152
Липень	31	11160	47430	13020	14880	8990	9672	105152
Червень	30	10800	45900	12600	14400	8700	9360	101760

Продовження табл.2.9

Місяць	Кількість днів	Склад готової продукції	Основний виробничий цех	Ділянка сушіння матеріалів	Складське приміщення для первинного оброблення сировини	Котельне відділення	АПК	Загалом
Травень	31	11160	47430	13020	14880	8990	9672	105152
Квітень	30	10800	45900	12600	14400	8700	9360	101760
Березень	31	11160	47430	13020	14880	8990	9672	105152
Лютий	28	10080	42840	11760	13440	8120	8736	94976
Січень	31	11160	47430	13020	14880	8990	9672	105152
РАЗОМ	365	131400	558450	153300	175200	105850	113880	1238080

На рис. 2.4 візуалізована динаміка споживання електроенергії за рік .

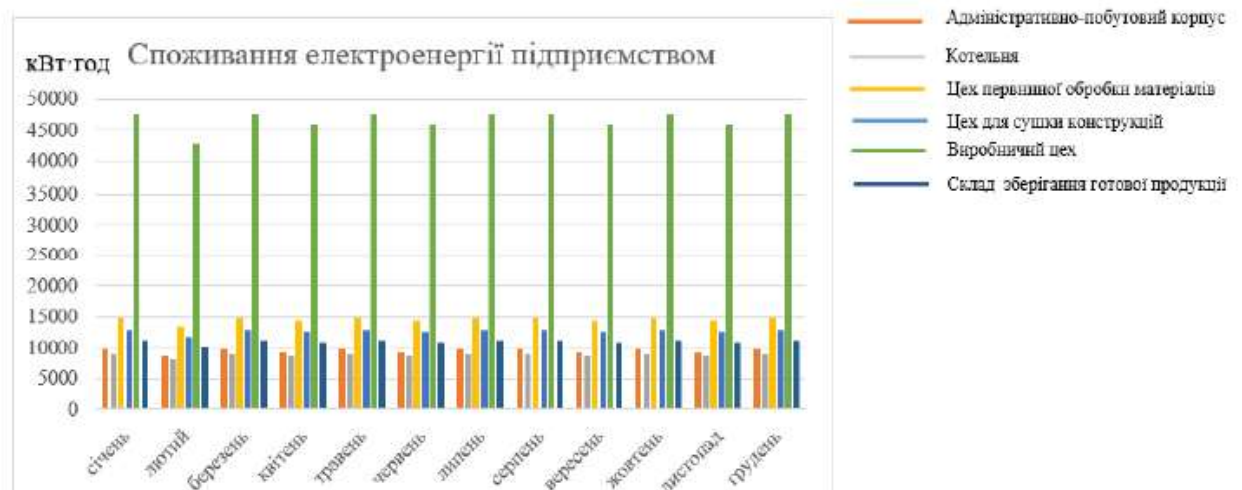


Рисунок 2.4 – Структура річного споживання електричної енергії за об'єктами підприємства

Впродовж звітної періоду загальне річне електроспоживання усіх приміщень промислового об'єкта становило 1238080 кВт год.

На рис. 2.4 представлена деталізована помісячна динаміка споживання ЕЕ, розподілена між основними структурними підрозділами підприємства. Вісь абсцис відображає календарні місяці року, тоді як вісь ординат — обсяг спожитої ЕЕ у кіловат-годинах. Кожне функціональне приміщення — АПК, котельне відділення, складське приміщення для первинної сировини, ділянка

сушіння матеріалів (сушарня), основний виробничий цех та склад зберігання готової продукції — ідентифіковано окремою кольоровою лінією або сегментом на діаграмі, що дозволяє візуально оцінити внесок кожного споживача у загальний річний баланс. Аналіз діаграми підтверджує, що найбільшим споживачем очікувано є виробничий цех, що зумовлює відносно стабільний рівень загального споживання протягом року, за винятком невеликих коливань, пов'язаних із кількістю днів у місяці.

Висновки до розділу 2

У розділі 2 було здійснено комплекс підготовчих розрахунків, необхідних для проектування гібридної фотоелектричної системи електропостачання промислового об'єкта. На першому етапі було визначено та обрано промисловий об'єкт, для якого здійснювалися всі подальші інженерні розрахунки та оцінка ефективності системи.

1. З метою визначення максимальної пікової потужності, необхідної для коректного вибору обладнання, було проведено добове профілювання споживання. Доба була розділена на ключові періоди (ранковий, денний, вечірній, нічний). Шляхом агрегування пікових потужностей окремих електроспоживачів у відповідних часових інтервалах було розраховано максимальне навантаження на кожен частину доби.

2. Здійснено розрахунок та вибір перерізу електричних кабелів та проводів для розподільчої мережі 0,38 кВ та ПЛ 10 кВ. Вибір провідників виконано з урахуванням допустимого тривалого струму та перевіркою за допустимими втратами напруги. Для ПЛ 10 кВ додатково враховано вимоги Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) щодо мінімального перерізу провідника за механічною міцністю.

3. На основі отриманої максимальної розрахункової потужності споживачів було обґрунтовано вибір номінальної потужності силового трансформатора. Також підібрано комутаційні апарати на стороні напруги 0,4 кВ. Ці апарати обиралися за номінальним струмом для забезпечення надійної та

безпечної експлуатації електричних мереж та обладнання шляхом захисту від надструмів.

4. Виконано розрахунок струмів короткого замикання (КЗ) у найбільш віддаленій точці мережі, що є необхідним для коректного налаштування релейного захисту та перевірки комутаційної здатності апаратів. На завершення, проведено аналіз річного електроспоживання підприємства з формуванням помісячних даних та їх візуалізацією, що є ключовим вихідним параметром для подальшого проектування фотоелектричної системи.

РОЗДІЛ 3.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ГІБРИДНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Розробка концептуального проєкту сонячної електростанції (СЕС) для промислового об'єкта

Проектування сонячної електростанції розпочинається з обґрунтованого вибору ключового компонента — фотоелектричного модуля (ФЕМ). Для досягнення високої питомої потужності на обмеженій площі покрівель обрано монокристалічну панель типу JA Solar 400 Wp 35V JAM 72-S10-400-PR. У табл. 3.1 деталізовано її основні технічні параметри, які були використані для моделювання.

Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики обраного фотоелектричного модуля JA Solar 400 Wp

Параметр	Значення, од. вимірювання
Номінальна максимальна потужність (P_{max})	400 Вт
Тип комірки	Монокристалічний кремній
Напруга в точці макс. потужності (V_{mp})	41,17 В
Струм у точці макс. потужності (I_{mp})	9,72 А
Напруга неробочого ходу (V_{oc})	400 Вт
Струм короткого замикання (I_{sc})	10,26 А
Максимальне значення напруги системи	1500 В
ККД модуля	19,90
Значення габаритних розмірів (Дов\ Шир \Глиб)	2015 \ 996 \ 40 \ мм
Вага	22,7 кг
Ступінь захисту	IP 68

Переваги обраного ФЕМ:

- Підвищена надійність: Модуль побудований за технологією Half-Cut Cell (напівкомірки), що підвищує його стійкість до ефектів часткового затінення і знижує втрати потужності через внутрішній опір.
- Ефективність: Застосування інноваційного покриття сприяє більш ефективному захопленню сонячного випромінювання.
- Технологія PERC: Використання пасивованого емітера із заднім контактом (Passivated Emitter Rear Contact) забезпечує відбиття сонячного світла, яке пройшло крізь кремнієву комірку, назад, що дозволяє додатково генерувати електричну енергію та підвищує загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) модуля.

Оскільки будівлі підприємства мають плоскі дахи, для розміщення фотомодулів застосовується баластна система кріплення. Цей метод не потребує проникнення кріпильних елементів у покрівлю, що зберігає її цілісність, і використовує вагу баласту для забезпечення стійкості конструкції.



Рисунок 3.1 – Схематичне зображення системи кріплення панелей (баластна система)

Ключові переваги баластної системи:

- Оптимізація простору: Забезпечує можливість зменшення ефектів затінення між рядами панелей, оптимізуючи загальну площу генерації.

- Тепловий режим: Сприяє належній вентиляції модулів, що є критично важливим, оскільки зниження робочої температури підвищує їхню ефективність.

- Міцність: Конструкції з оцинкованої сталі або алюмінію відзначаються високою міцністю, здатною витримувати як масу модулів, так і вітрові/снігові навантаження. З економічної точки зору, використання оцинкованих профілів є більш вигідним порівняно з алюмінієвими аналогами.

Розміщення та розрахунок очікуваної генерації ФЕС здійснювалося в програмному комплексі PVsyst, який є світовим галузевим стандартом для моделювання та проектування сонячних систем.

Можливості PVsyst:

- Прогнозування генерації: Дозволяє проводити погодинну оцінку генерації енергії з урахуванням місцевих метеорологічних даних (Meteonorm).

- Детальне моделювання: Враховує втрати енергії в системі (від модуля до інвертора), а також моделює вплив затінення за допомогою вбудованих 3D-моделей.

- Економічна оцінка: Використовується для визначення очікуваної річної продуктивності СЕС та проведення оцінки окупності інвестицій.

Проектування розміщення ФЕМ розпочалося з AutoCAD, де, відповідно до габаритних розмірів обраних панелей 2015\996\40\ мм), було розроблено плани їхнього розміщення на дахах будівель.

1. Географічні параметри: У розділі «Orientation» програми PVsyst були задані координати об'єкта, значення кута нахилу становить 30°, азимут відповідно -15° відносно півдня.

2. Габаритний розрахунок: З метою коректного розміщення та розрахунку відстані між рядами, що мінімізує затінення, було визначено горизонтальну проекцію конструкції (B) при куті нахилу 30°:

$$B = C \cdot \cos 30^\circ \quad (3.1)$$

де $C = 996$ мм (висота панелі у вертикальній проекції).

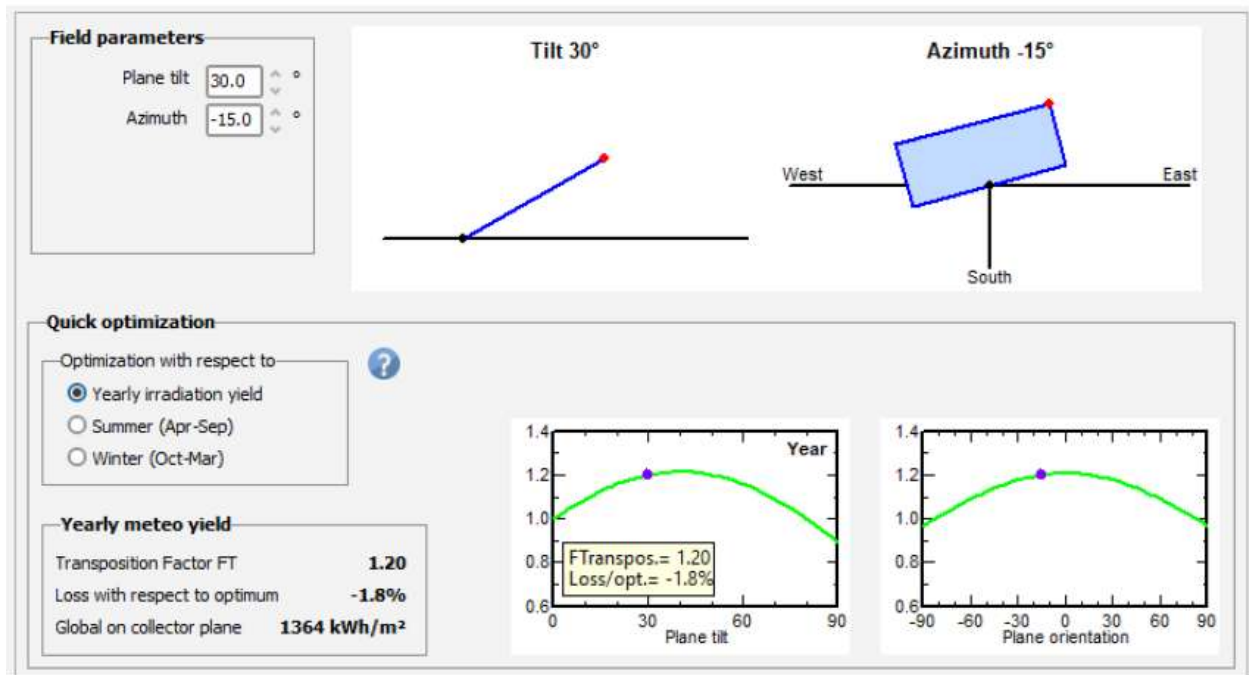


Рисунок 3.2 – Налаштування кута нахилу та азимуту площини ФЕМ у PVsyst

$$B = 996 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 862,56 \text{ мм}$$

Визначення встановленої потужності СЕС:

$$P_{\text{встан.}} = n \cdot P_{\text{панелей}} \quad (3.2)$$

де n – загальна кількість встановлених ФЕМ, $P_{\text{панелей}}$ – номінальна потужність одного модуля (400 Вт).

Проектне розміщення модулів на покрівлях будівель, з урахуванням розрахункових габаритів та вимог щодо затінення, представлено на рис. 3.3.

На основі розробленого проекту розміщення, загальна кількість фотомодулів та їх розподіл між будівлями представлені у табл. 3.2.

Наступним критично важливим етапом є вибір мережевого інвертора, який забезпечить перетворення постійного струму від ФЕМ у змінний струм для живлення потреб підприємства та синхронізації з існуючою мережею.

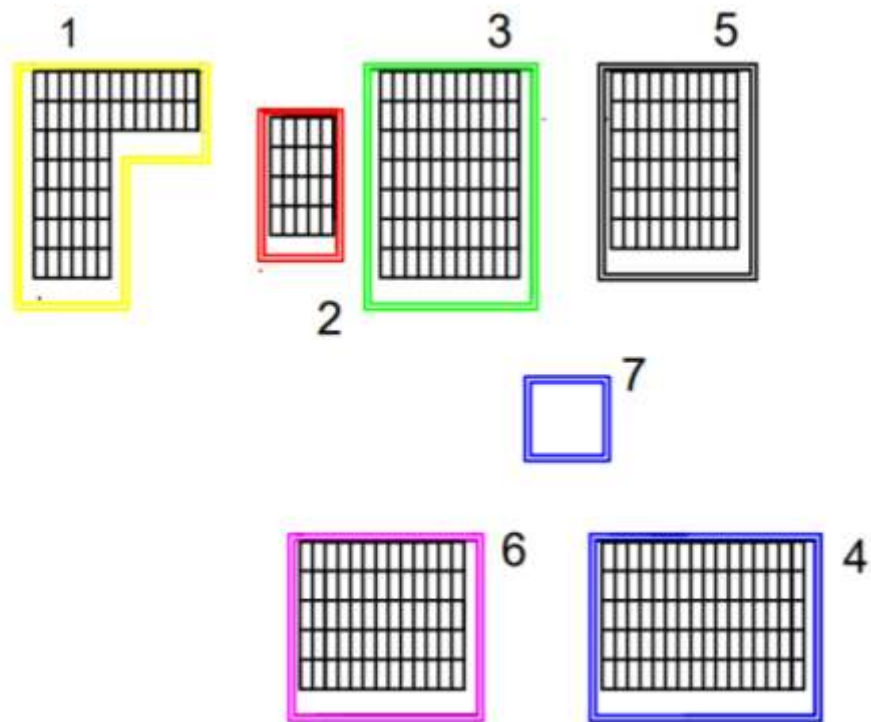


Рисунок 3.3 – Схема розміщення фотоелектричних модулів на покрівлях будівель підприємства

Таблиця 3.2 – Розподіл фотоелектричних модулів на об'єктах підприємства

Об'єкт підприємства	Кількість ФЕМ, шт. (n)
АПК	56
Котельне відділення	20
Складське приміщення для первинної сировини	77
Ділянка сушіння матеріалів	80
Основний виробничий цех	60
Склад готової продукції	65
Загалом	358

Для проєктування обрано інвертори від Huawei Technologies, які зарекомендували себе як високонадійне обладнання світового класу.

Ключові переваги інверторів Huawei:

- Надійність та обслуговування: Виробник пропонує високий рівень гарантійної підтримки, часто включаючи оперативну заміну компонентів.

- Широка сумісність: Забезпечує інтеграцію з різними типами фотоелектричних модулів.
- Конструктивні особливості:
 - Високий ступінь захисту корпусу (IP-клас): Гарантує довготривалий термін служби в умовах промислового середовища.
 - Широкий температурний діапазон: Здатність ефективно працювати в різноманітних кліматичних умовах.
 - Активне охолодження: Підтримка оптимальної робочої температури, що мінімізує передчасний знос і підвищує ККД.
 - Комплексна система захисту: Наявність вбудованого захисту від дугових розрядів (Arc Fault Circuit Interrupter - AFCI) та захисту від перевантажень, що суттєво підвищує безпеку експлуатації СЕС.
- Далі представлено пооб'єктне проєктування СЕС, що включає візуалізацію розміщення фотоелектричних модулів (ФЕМ) та підбір відповідних мережевих інверторів, узгоджених за допомогою програмного комплексу PVsyst.

Адміністративно-побутовий корпус (АПК)

1. Розміщення ФЕМ:

Згідно з проєктом, візуалізованим на Рисунку 3.4, на площі даху АПК було розміщено 56 ФЕМ обраної моделі JA Solar 400 Вт.

2. Встановлена потужність:

Розрахункова встановлена потужність $P_{\text{встан.}}$ для даного об'єкта склала:

$$P_{\text{встан.}} = 56 \cdot 400 \text{ Вт} = 22400 \text{ Вт} = 22,4 \text{ кВт}$$

3. Вибір інвертора та узгодження: для перетворення згенерованої енергії обрано трифазний мережевий інвертор типу Huawei SUN2000-20KTL-M5. Його технічні параметри, що забезпечують ефективне узгодження з ФЕМ, наведені у табл. 3.3.

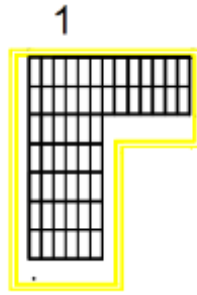


Рисунок 3.4 – Розміщення фотоелектричної системи на даху АПК

Таблиця 3.3 – Основні характеристики інвертора типу Huawei SUN2000-20KTL-M5

Найменування	Значення
Модель (базове комплектування)	SUN2000-20KTL-M5
Інвертор (базове комплектування)	Мережевий, трифазний
Макс. вхідна потужність DC, Вт	30000,0
Макс. вхідна напруга, В	1100,0
Діапазон напруги MPPT, В	200,0-1000,0
Макс. вхідний струм, А	30,0
Пускова напруга, В	200,0
Розміри (В \ Ш \ Г), мм	460,0 \ 546,0 \ 228,0
Вага, кг	21,0

Узгодження в PVsyst: програма PVsyst підтвердила оптимальну конфігурацію, запропонувавши використання 56 модулів, що повністю збігається з проектною кількістю (рис. 3.5). Це свідчить про коректний підбір обладнання.

Котельне відділення

1. Розміщення ФЕМ: на даху котельні (див. рисунок 3.6) вдалося розмістити 20 ФЕМ відповідно до габаритів будівлі.

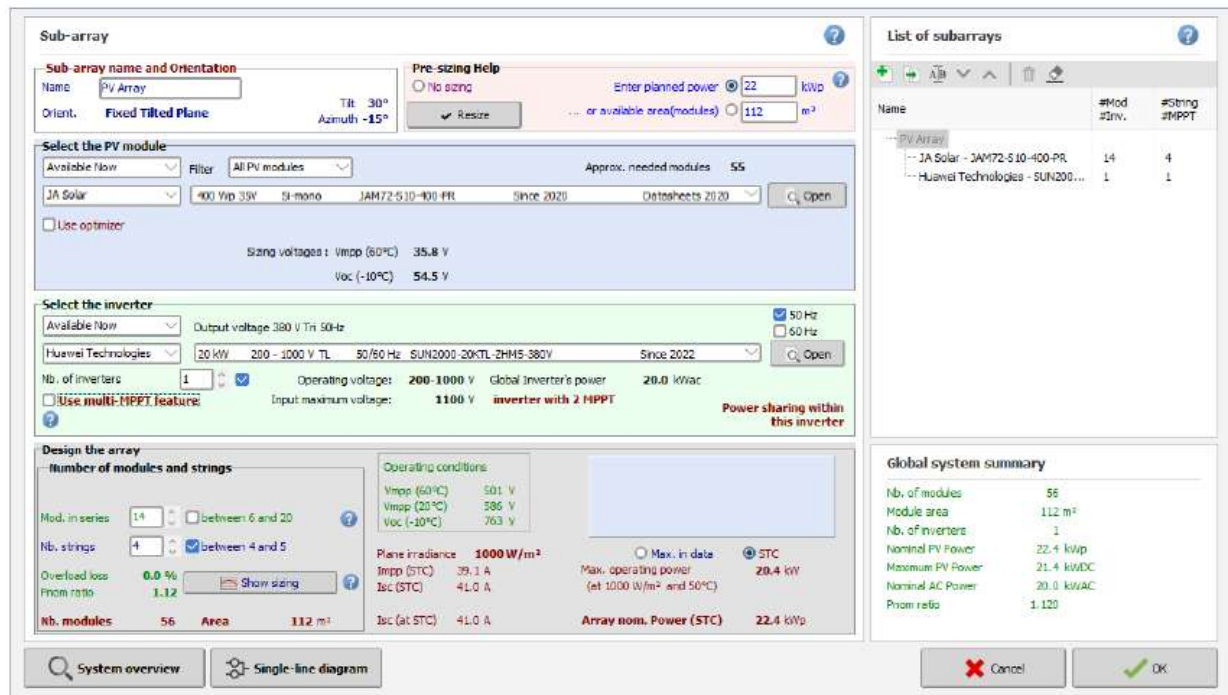
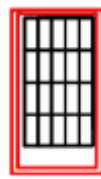


Рисунок 3.5 – Інтерфейс оптимізації конфігурації СЕС для АПК



2

Рисунок 3.6 – Розміщення фотоелектричної системи на даху котельні

2. Встановлена потужність для котельного відділення склала:

$$P_{\text{встан.}} = 20 \cdot 400 \text{ Вт} = 8000 \text{ Вт} = 8,0 \text{ кВт}$$

3. Вибір інвертора та узгодження: обрано трифазний інвертор Huawei SUN2000-8KTL-M1-380V з номінальною потужністю 8 кВт.

У табл. 3.4 подано базові технічні характеристики інвертора.

Програма моделювання також підтвердила оптимальність конфігурації, запропонувавши 20 модулів для цього інвертора, що узгоджується з рис.3.7. Отже, додаткове коригування кількості ФЕМ не потрібне.

Таблиця 3.4 – Основні параметри інвертора типу Huawei SUN2000-8KTL-M1

Найменування	Значення
Модель	SUN2000-8KTL-M1
Інвертор (базове комплектування)	Мережевий (трифазний)
Номінальна потужність, кВт	8,0
Макс. потужність ФЕМ, кВт	12,0
МРРТ-трекери (кількість)	2,0
Макс. значення вх. напруги, В	1100,0
Ступінь захисту	IP 65
Варіація робочих температур	-25,0....+60,0 С

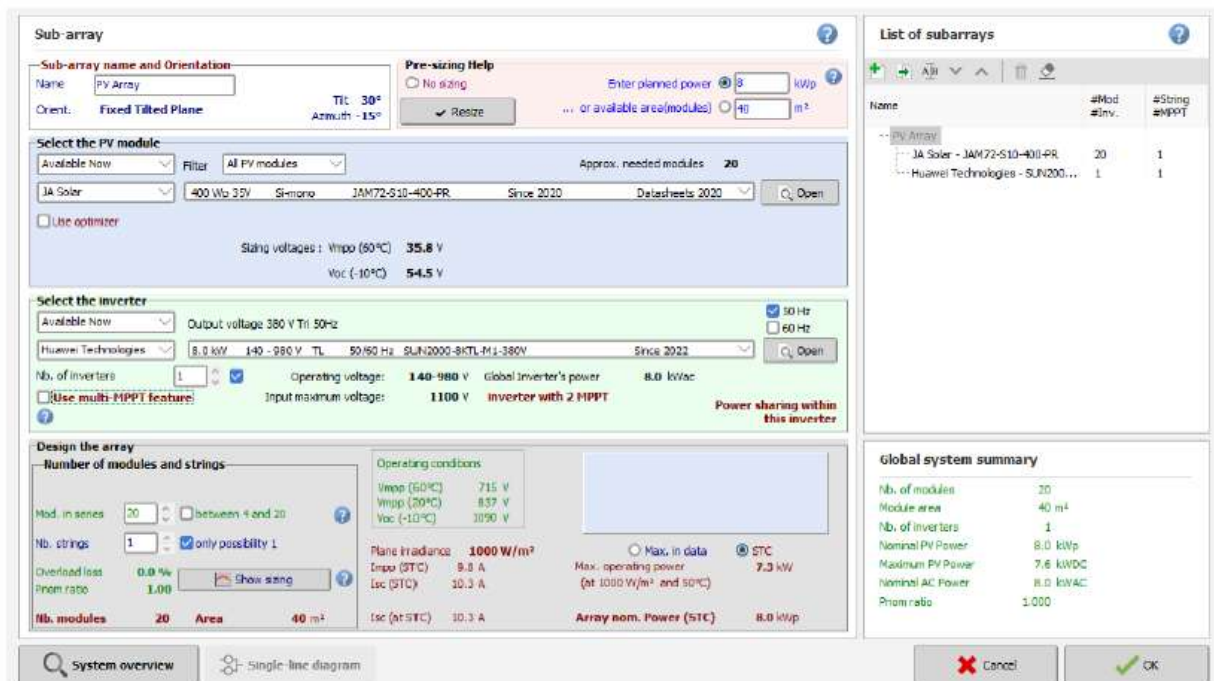


Рисунок 3.7 – Інтерфейс оптимізації конфігурації СЕС для котельного відділення

Складське приміщення для первинної сировини

1. Розміщення ФЕМ: попередній розрахунок дозволив розмістити на даху 77 ФЕМ (рис. 3.8).

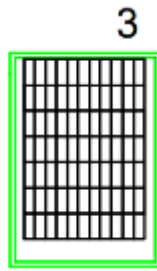


Рисунок 3.8 – Розміщення фотоелектричної системи на даху складського приміщення для первинної сировини

2. Початкова встановлена потужність складала:

$$P_{\text{встан.}} = 77 \cdot 400 \text{ Вт} = 30800 \text{ Вт} = 30,8 \text{ кВт}$$

3. Вибір інвертора та узгодження: обрано трифазний інвертор Huawei SUN2000-30KTL-M3. У табл. 3.5 подано його основні параметри.

Таблиця 3.5 – Основні параметри інвертора типу Huawei SUN2000-30KTL-M3

Найменування	Значення
Модель інвертора	SUN2000-30KTL-M3
Тип інвертора (базове комплектування)	Мережевий, трифазний
Номинальна потужність, Вт	30000
Кількість MPPT	4,0
MPPT діапазон напруги, В	48,0-800,0
Охолодження	Пасивне
Ступінь захисту	IP66

Після введення даних до PVsyst програма запропонувала оптимальну кількість модулів для даного інвертора — 76 шт. (рис. 3.9). Це вимагає коригування проєктної кількості ФЕМ, оскільки 77 модулів не можуть бути оптимально розподілені на стрінги.

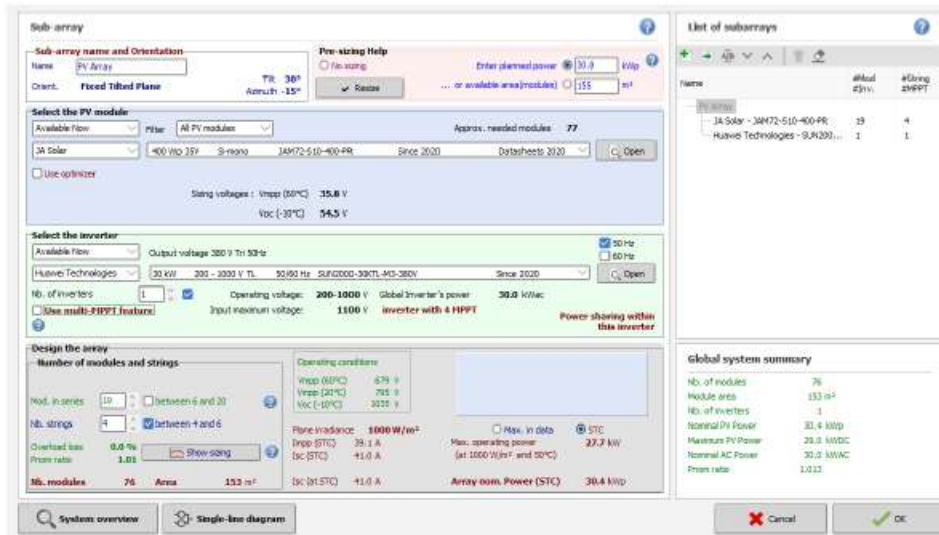


Рисунок 3.9 – Інтерфейс оптимізації конфігурації СЕС для складського приміщення для первинної сировини (початкове моделювання)

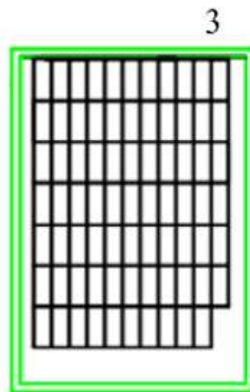


Рисунок 3.10 – Фактичне розміщення скоригованої СЕС на даху для складського приміщення первинної сировини (загальна кількість 76 шт.)

Фактична встановлена потужність:

$$P_{\text{встан., факт.}} = 76 \cdot 400 \text{ Вт} = 30400 \text{ Вт} = 30,4 \text{ кВт}$$

На рис. 3.11 подано результати моделювання скоригованої системи.

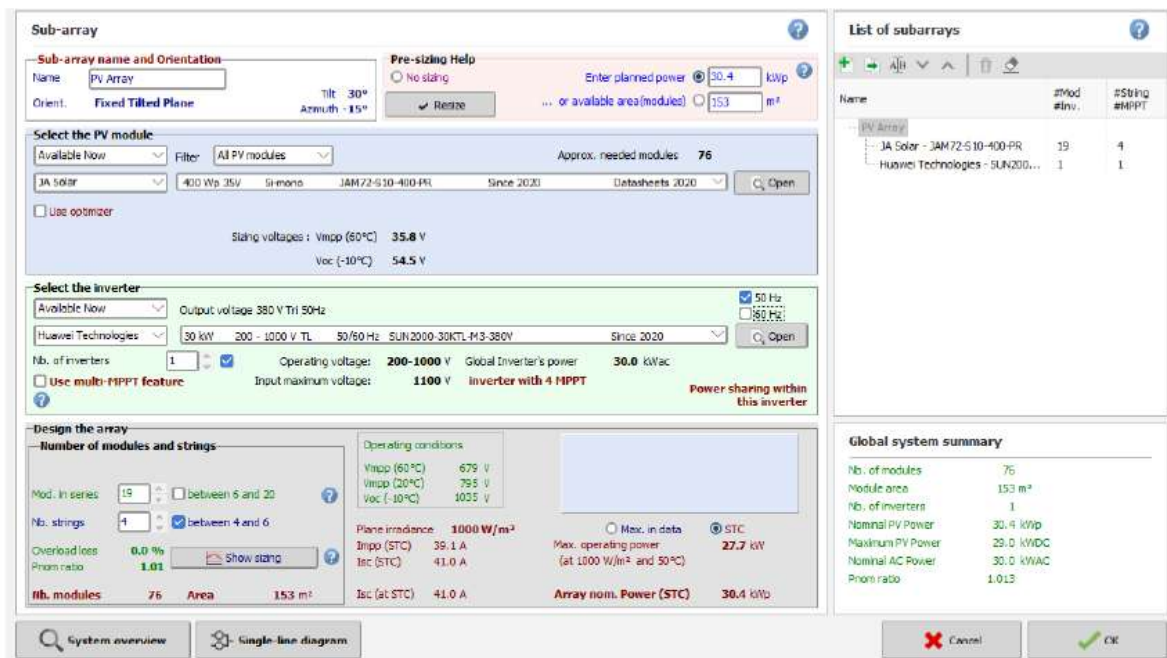


Рисунок 3.11 – Інтерфейс оптимізації скоригованої СЕС для складського приміщення первинної сировини

Ділянка сушіння матеріалів (сушарня)

1. Розміщення ФЕМ (рис. 3.12): на даху ділянки сушіння матеріалів розміщено 80 ФЕМ.

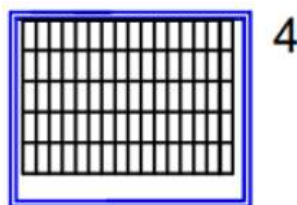


Рисунок 3.12 – Розміщення фотоелектричної системи на даху ділянки сушіння матеріалів

1. Встановлена потужність:

$$P_{\text{встан.}} = 80 \cdot 400 \text{ Вт} = 32000 \text{ Вт} = 32,0 \text{ кВт}$$

2. Вибір інвертора та узгодження: Обрано трифазний інвертор Huawei SUN2000-25KTL-M5. У табл. 3.6 подано технічні характеристики.

Таблиця 3.6 – Основні параметри інвертора типу Huawei SUN2000-25KTL-M5

Найменування	Значення
Номінальна потужність, кВт	25,0
Інвертор (базове комплектування)	Мережевий, трифазний
MPPT-трекери (загальна кількість)	2,0
Варіація роб. вх. напруг	200,0-1000,0 В
Коефіцієнт ефективності (ККД)	98,2
Клас захисту	IP66
Вага, кг	21,0

Моделювання підтвердило (рис. 3.13), що 80 модулів є оптимальною кількістю для обраного інвертора, додаткове коригування не потрібне.

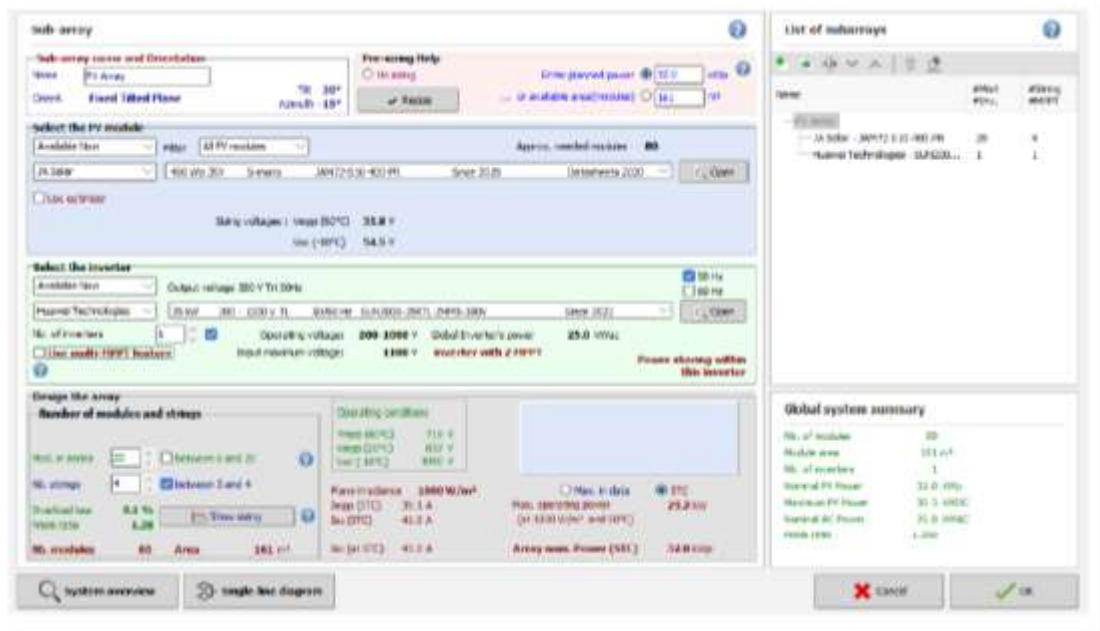


Рисунок 3.13 – Інтерфейс оптимізації СЕС для ділянки сушіння матеріалів

Основний виробничий цех

1. Розміщення ФЕМ (рис. 3.14): на даху виробничого цеху розміщено 60 ФЕМ.



Рисунок 3.14 – Розміщення фотоелектричної системи на даху основного виробничого цеху

2. Встановлена потужність:

$$P_{\text{встан.}} = 60 \cdot 400 \text{ Вт} = 24000 \text{ Вт} = 24,0 \text{ кВт}$$

3. Вибір інвертора та узгодження: Обрано інвертор типу Huawei SUN2000-20KTL-M5 (параметри в табл. 3.3).

Узгодження в PVsyst: Програма підтвердила, що 60 модулів оптимально узгоджуються з параметрами інвертора (рис. 3.15). Додаткове коригування не потрібне.

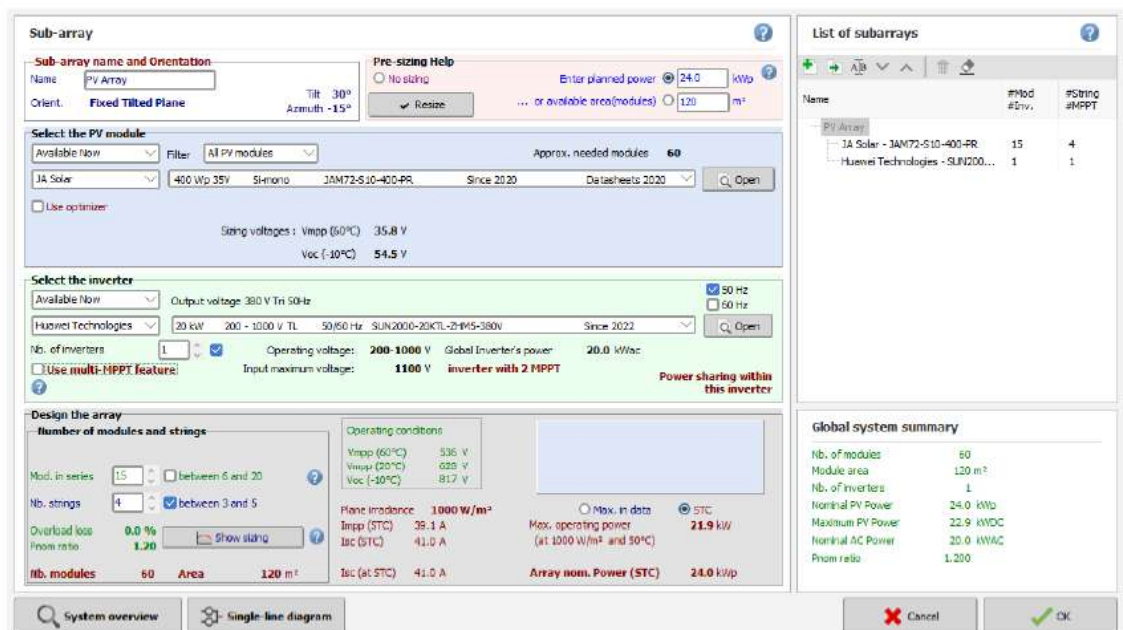


Рисунок 3.15 – Інтерфейс оптимізації СЕС для основного виробничого цеху

Склад готової продукції

1. Розміщення ФЕМ: проєктне розміщення передбачало 65 ФЕМ (рис. 3.16).

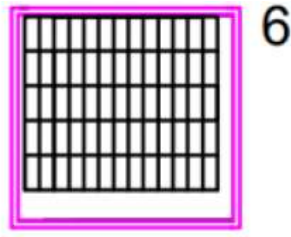


Рисунок 3.16 – Розміщення фотоелектричної системи на даху складу готової продукції

2. Встановлена потужність (початкова):

$$P_{\text{встан.}} = 65 \cdot 400 \text{ Вт} = 26000 \text{ Вт} = 26,0 \text{ кВт}$$

Вибір інвертора та узгодження: Обрано інвертор Huawei SUN2000-25KTL-M5 (параметри в табл. 3.6).

Узгодження та коригування в PVsyst: PVsyst запропонував оптимальну кількість — 64 модулі (рис. 3.17), оскільки 65 ФЕМ не можуть бути рівномірно розподілені на стрінги, або ж виходять за оптимальний діапазон напруг. Необхідно видалити 1 панель.

Фактична встановлена потужність: Кількість ФЕМ скориговано до 64 шт:

$$P_{\text{встан., факт.}} = 64 \cdot 400 \text{ Вт} = 25600 \text{ Вт} = 25,6 \text{ кВт}$$

Після проведення узгодження в PVsyst для інвертора Huawei SUN2000-25KTL-M5 було визначено, що оптимальна кількість фотоелектричних модулів становить 64 шт., тоді як початковий розрахунок передбачав 65 шт. Для коректної роботи системи було здійснено коригування розміщення шляхом видалення однієї зайвої панелі.

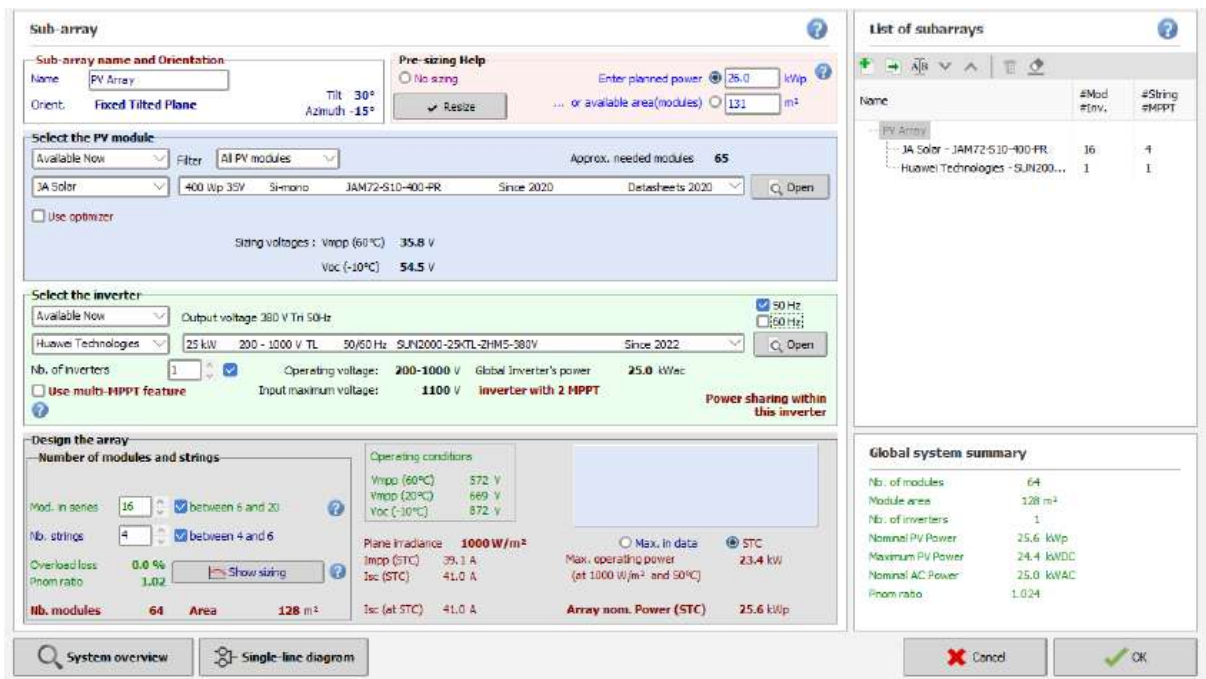


Рисунок 3.17 – Інтерфейс процесу оптимізації для складу готової продукції (початкове моделювання)

Новий план розміщення 64 ФЕМ на даху складу готової продукції представлено на рис. 3.17 а.

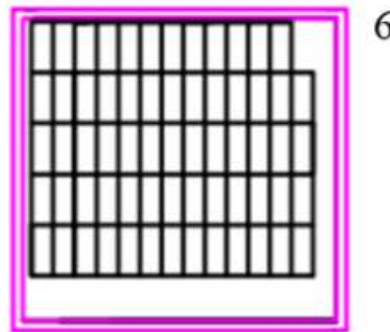


Рисунок 3.17 а – Скорговане розміщення 64 ФЕМ на даху складу готової продукції

Результати фінального моделювання скоригованої системи (рис. 3.18) в інтерфейсі PVsyst підтверджують оптимальне узгодження обладнання.

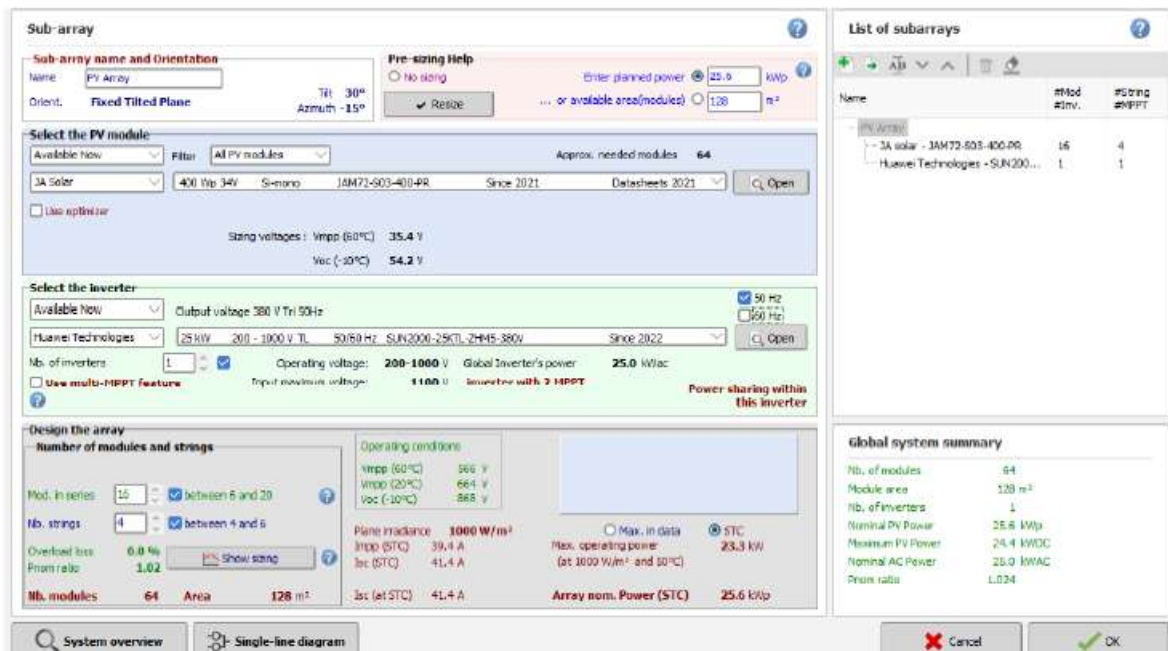


Рисунок 3.18 – Процес оптимізації скоригованої СЕС для складу готової продукції

Загальне розміщення та орієнтація

Для досягнення максимальної річної генерації було прийнято стандартне технічне рішення: орієнтація всіх фотоелектричних модулів точно на південь (азимут 0 або -15 за проектом) із кутом нахилу 30. Така орієнтація забезпечує отримання найбільшої кількості сонячної радіації протягом світлового дня, мінімізуючи втрати від кута падіння та відбиття.

Загальна схема розміщення всіх скоригованих масивів СЕС на дахах підприємства візуалізована на рис. 3.19.

Таблиця 3.7 узагальнює фактичну кількість встановлених ФЕМ для кожного об'єкта після узгодження з параметрами інверторного обладнання.

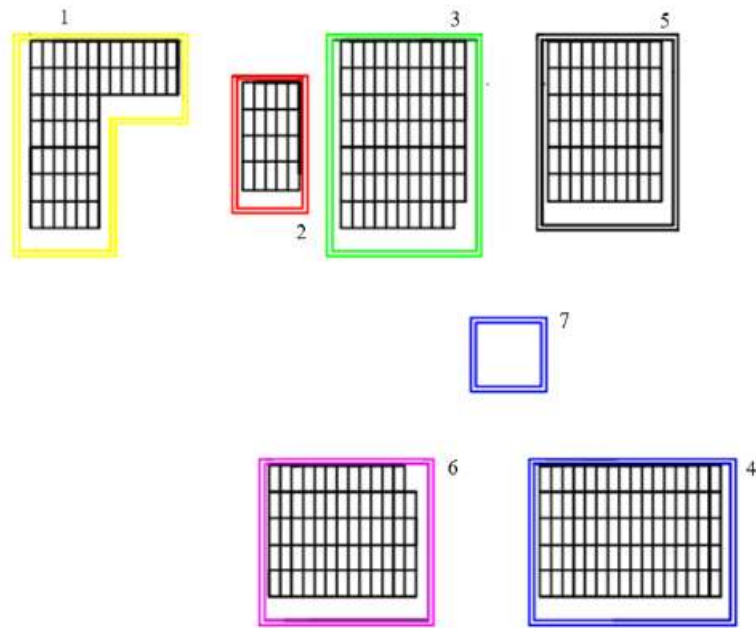


Рисунок 3.19 – Фінальна схема розміщення фотоелектричних модулів на дахах підприємства

Таблиця 3.7 – Фінальний розподіл фотоелектричних модулів на об'єктах підприємства

Об'єкт підприємства	Кількість ФЕМ, шт.
АПК	56
Котельне відділення	20
Складське приміщення для первинної сировини	76
Ділянка сушіння матеріалів (сушарня)	80
Основний виробничий цех	60
Склад готової продукції	64
Загальна кількість	356

3.2. Моделювання структурної схеми підключення СЕС

Для кожного спроектованого об'єкта в розділі «Звіт (Report)» програмного забезпечення PVsyst була сформована спрощена структурна блок-схема фотоелектричної установки. Ці схеми відображають ключові компоненти та їхнє електричне з'єднання: ФЕМ, стрінги, інвертор та точка введення (Injection Point).

Компонент	Функція
Фотоелектричний модуль (ФЕМ)	Пристрій, що перетворює енергію сонячного світла на постійний електричний струм (DC).
Стрінг	Послідовне електричне з'єднання ФЕМ, що формує необхідну робочу напругу для інвертора.
Інвертор	Ключовий пристрій, що перетворює постійний струм (DC) від стрінгів у змінний струм (AC), придатний для використання у внутрішній та зовнішній мережі.
Точка введення	Місце приєднання згенерованої електричної енергії до внутрішньої розподільчої мережі підприємства.

Далі представлені параметри конфігурації для кожного об'єкта:

Адміністративно-побутовий корпус (АПК):

- Інвертор: 20 кВт.
- Кількість стрінгів: 4 шт.
- Кількість ФЕМ у стрінгу: 14 шт. (Загалом $4 \times 14 = 56$ шт.)



Рисунок 3.20. Схема для будівлі АПК

Котельне відділення

- Інвертор: 8 кВт.
- Кількість стрінгів: 1 шт.
- Кількість ФЕМ у стрінгу: 20 шт. (Загалом $1 \times 20 = 20$ шт.)



Рисунок 3.21. Схема для будівлі котельного відділення

Складське приміщення для первинної сировини

- Інвертор: 30 кВт (4 МРРТ-трекери).
- Кількість стрінгів: 4 шт.
- Кількість ФЕМ у стрінгу: 19 шт. (Загалом $4 \times 19 = 76$ шт.)

Примітка: Використання 4 МРРТ-трекерів забезпечує незалежну оптимізацію роботи для кожної групи ФЕМ.

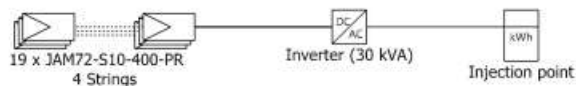


Рисунок 3.22. Схема для складського приміщення первинної сировини

Ділянка сушіння матеріалів (сушарня)

- Інвертор: 25 кВт.
- Кількість стрінгів: 4 шт.
- Кількість ФЕМ у стрінгу: 20 шт. (Загалом $4 \times 20 = 80$ шт.)

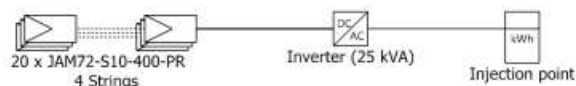


Рисунок 3.23. Схема для ділянки сушіння матеріалів

Основний виробничий цех

- Інвертор: 20 кВт.
- Кількість стрінгів: 4 шт.
- Кількість ФЕМ у стрінгу: 15 шт. (Загалом $4 \times 15 = 60$ шт.)

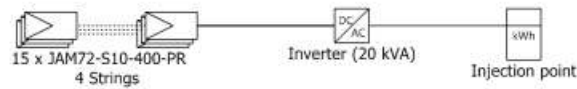


Рисунок 3.24. Схема для основного виробничого цеху

Склад готової продукції

- Інвертор: 25 кВт.
- Кількість стрінгів: 4 шт.
- Кількість ФЕМ у стрінгу: 16 шт. (Загалом $4 \times 16 = 64$ шт.)

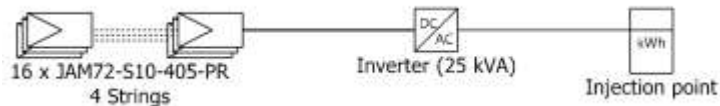


Рисунок 3.25. Схема для складу готової продукції

3.3. Аналіз річної генерації фотоелектричної системи

Програмне забезпечення PVsyst дозволило змоделювати помісячний графік генерації електричної енергії для кожної СЕС. Аналіз цих графіків (рис. 3.26 – 3.31) є необхідним для оцінки проектної ефективності, виявлення потенційних втрат (наприклад, від затінення чи кабельних втрат) та врахування впливу метеорологічних умов (радіація, температура, хмарність).

Ключовим показником моделювання є E_{Grid} , що відображає кількість електричної енергії, яка фактично буде подана до внутрішньої мережі підприємства (або загальної мережі) після втрат у системі.

Таблиця 3.8 – Прогнозовані загальні обсяги генерації СЕС для підприємства (E_Grid), кВт·год

Місяць	К-сть днів	Склад гот. пр. (64 шт.)	Основний виробн. цех (60 шт.)	Ділянка сушіння матеріалів (80 шт.)	Складське приміщення (76 шт.)	Котельне відділення (20 шт.)	АПК (56 шт.)	Сума (за місяць)
Грудень	31	901	833	1108	1053	271	777	4943
...
Червень	30	3689	3409	4530	4324	1129	3173	20254
...
Січень	31	1058	978	1302	1238	319	913	5808
РАЗОМ за рік	365	30248	27961	37162	35440	9230	26045	166086

Загальний обсяг річної генерації для всього промислового об'єкта становить 166086 кВт год.

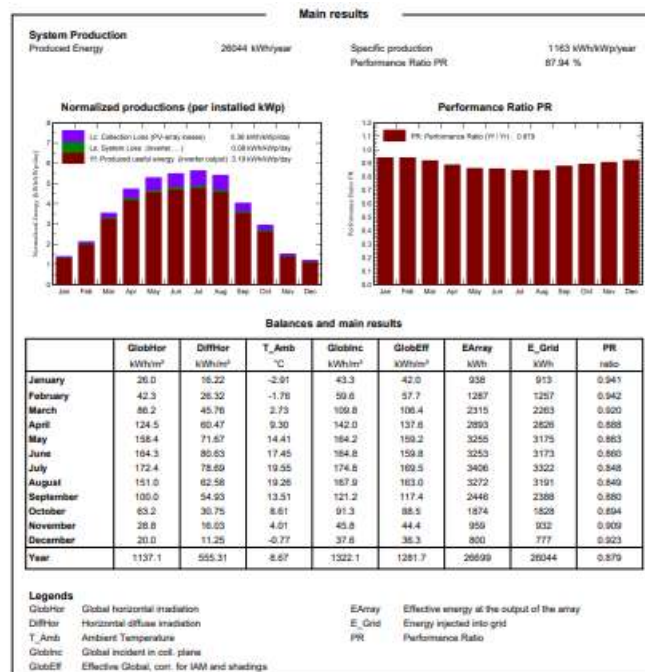


Рисунок 3.26 – Генерація для АПК

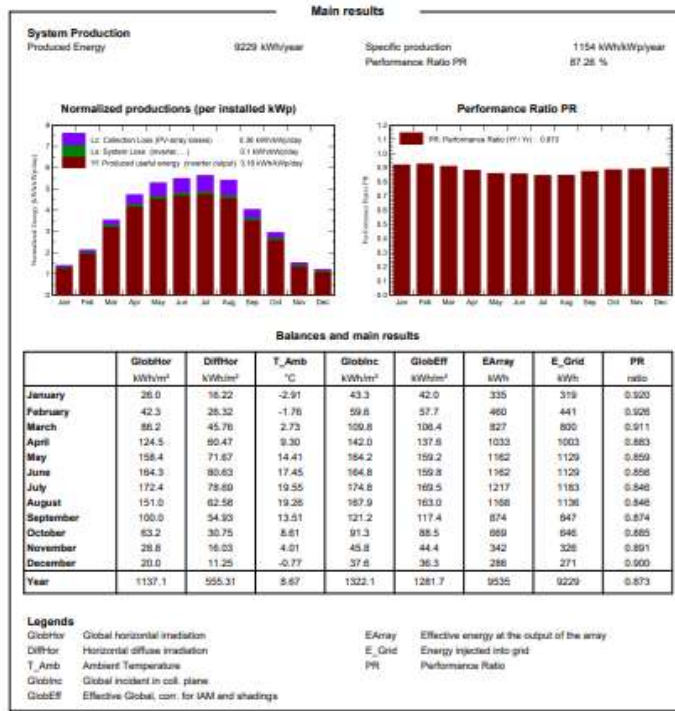


Рисунок 3.27 – Графік моделювання генерації для котельного відділення

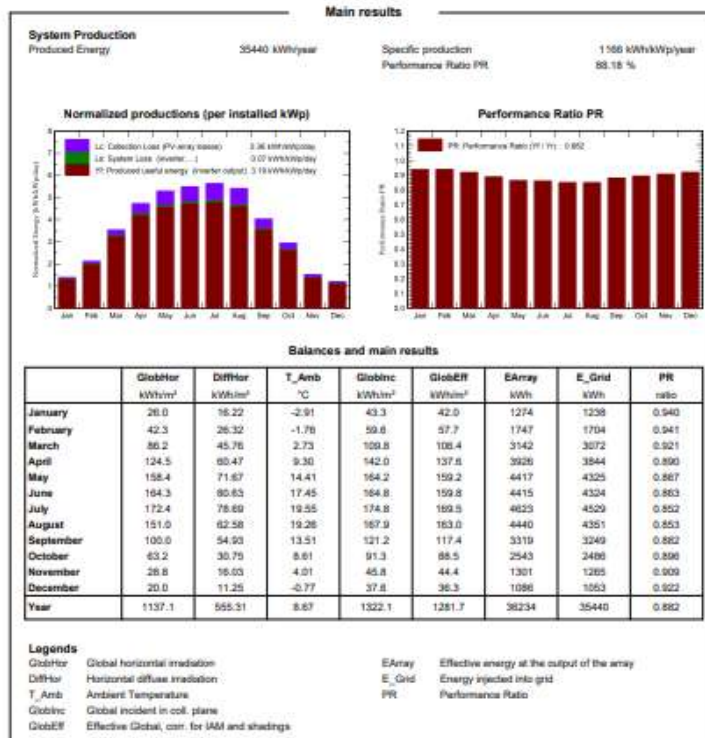


Рисунок 3.28 – Графік моделювання генерації для складського приміщення первинної сировини

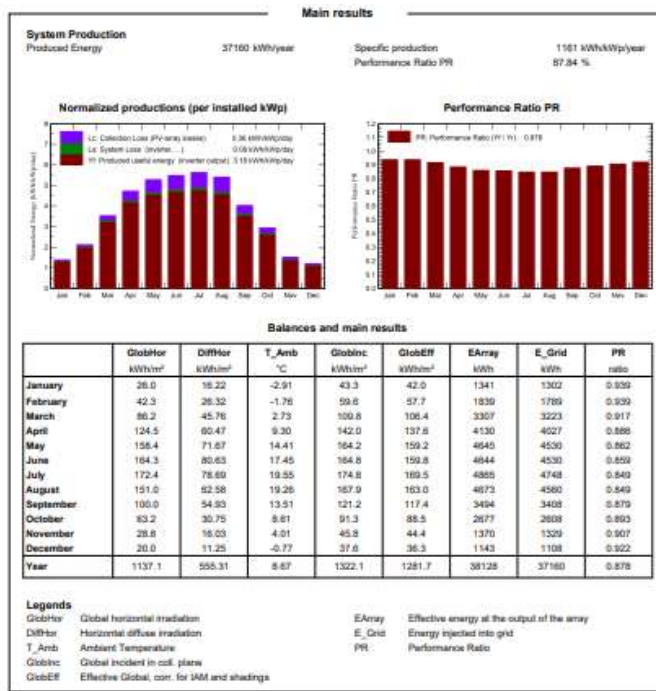


Рисунок 3.29 – Графік моделювання генерації для ділянки сушіння матеріалів

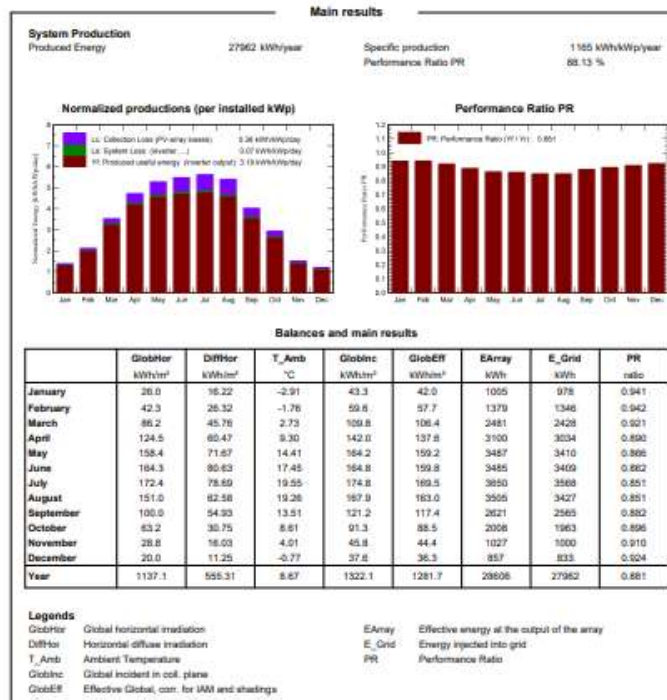


Рисунок 3.30 – Графік моделювання генерації для основного виробничого цеху

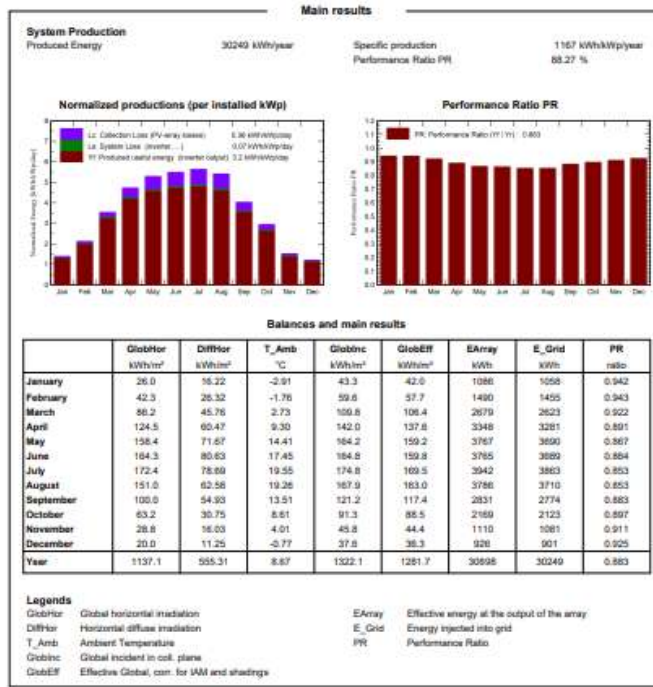


Рисунок 3.31 – Графік моделювання генерації для складу готової продукції

Для наочної оцінки загального внеску СЕС у покриття потреб підприємства сформовано діаграму помісячної сумарної генерації (рис. 3.32).

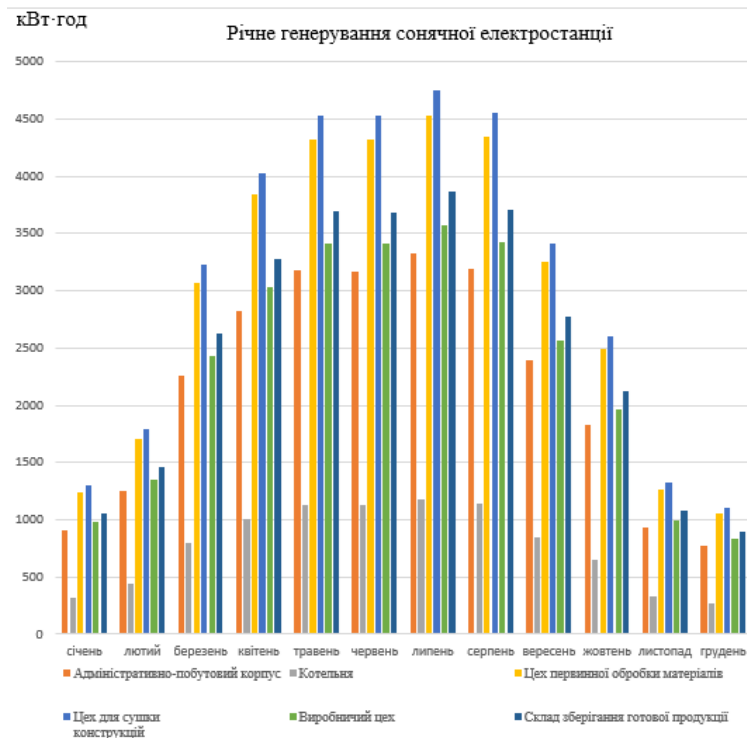


Рисунок 3.32 – Ілюстрація діаграми помісячної генерації СЕС, розподілена за об'єктами

Основні висновки з аналізу генерації:

1. Розподіл генерації: Обсяг виробленої енергії безпосередньо залежить від кількості встановлених ФЕМ на даху кожного об'єкта та їхньої встановленої потужності.

2. Сезонні коливання: Чітко простежується виражена сезонна динаміка генерації, характерна для сонячних систем: максимальне виробництво припадає на весняно-літній період (квітень-серпень), а мінімальне – на осінньо-зимовий (листопад-лютий), що зумовлено зміною довжини світлового дня та інтенсивності сонячної радіації.

З метою оцінки ступеня енергетичної незалежності, досягнутого в результаті впровадження СЕС, виконано порівняння помісячного споживання електроенергії (Розділ 2) та прогнозованої генерації для кожного об'єкта. (рис. 3.33 – 3.38).



Рисунок 3.33 – Порівняння графіків споживання для генерування для АПК



Рисунок 3.34 – Порівняння графіків споживання для генерування для котельного відділення

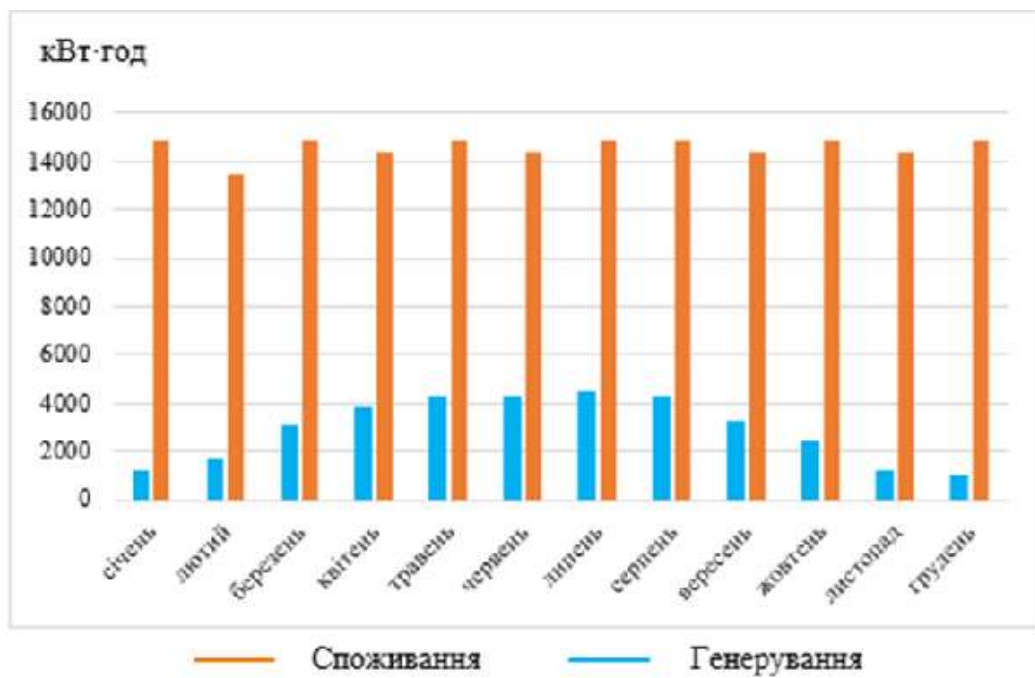


Рисунок 3.35 – Порівняння графіків споживання для генерування для складського приміщення для первинної сировини



Рисунок 3.36 – Порівняння графіків споживання для генерування для основного виробничого цеху

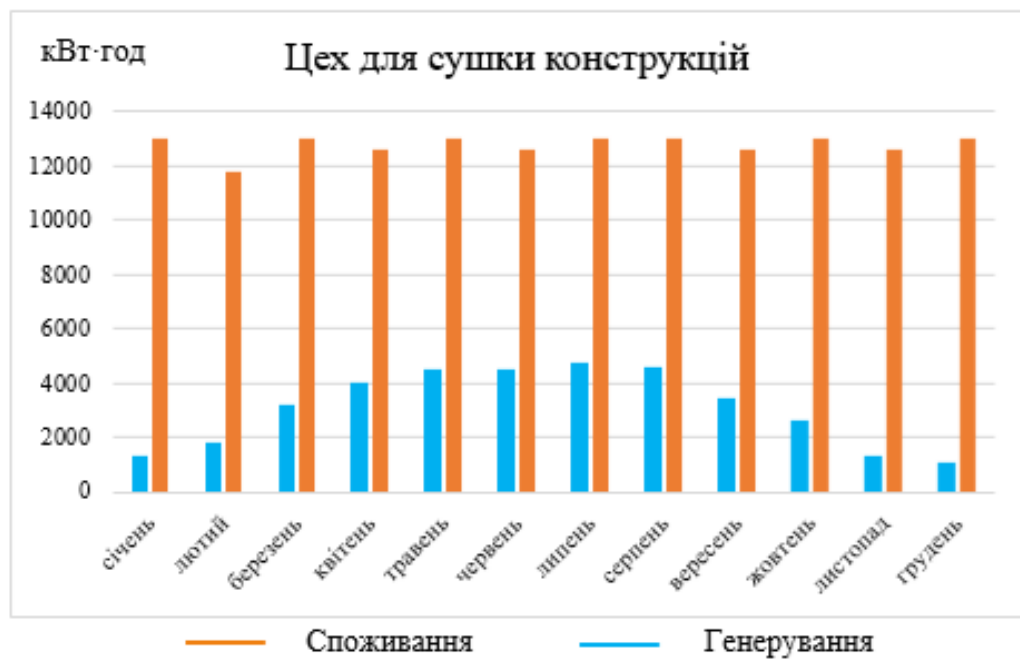


Рисунок 3.37 – Порівняння графіків споживання для генерування для ділянки сушіння матеріалів

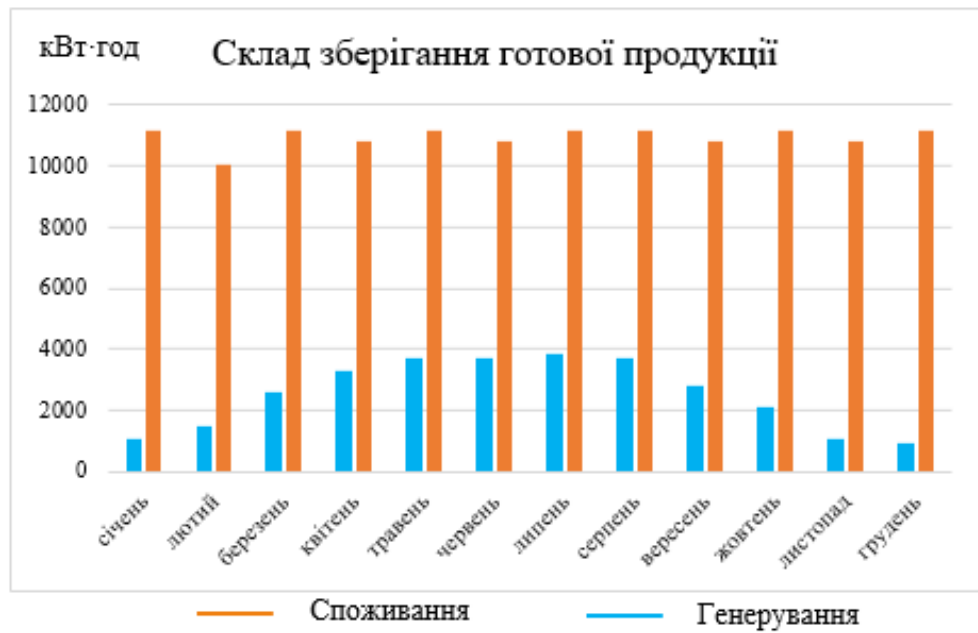


Рисунок 3.38 – Порівняння графіків споживання для генерування для складу готової продукції

Загальні тенденції:

- Спостерігається сезонне коливання як споживання, так і генерації.
- Річний обсяг генерації системи є нижчим за річне споживання підприємства, що характерно для систем, встановлених на обмежених площах (даху).
- Пікове споживання зазвичай припадає на холодний період (осінь-зима), що може бути пов'язано з інтенсивним використанням освітлення та, ймовірно, електричних нагрівальних елементів.
- Пікова генерація припадає на теплий період, частково компенсуючи зростання літнього споживання (кондиціонування).

3.4. Розрахунок капітальних витрат на впровадження фотоелектричної системи

Для визначення економічної доцільності проєкту необхідно провести детальний розрахунок витрат на придбання та встановлення усіх компонентів гібридної фотоелектричної системи (ФЕС). Кошторис включає вартість

фотомодулів, інверторів, комутаційної апаратури, кабельної продукції та систем кріплення.

У табл. 3.9 деталізовано вартість обладнання, розподілену за об'єктами підприємства, а також загальні системні компоненти.

Таблиця 3.9 – Зведений кошторис вартості обладнання для фотоелектричної системи

Об'єкт / Найменування компонента	Кіль- ть, шт/м	Вартість за шт/м, грн	Всього, грн (з ПДВ)
Адміністративно-побутовий корпус (22.4 кВт)			421 650,00
ФЕМ JA Solar 400 Вт	56	5200,00	291 200,00
Інвертор Huawei 20 кВт (SUN2000-20KTL-M5)	1	105 664,00	105 664,00
Кабель сил. АВВГ 4x35,0	70	114,28	7 999,60
Щит захисту DC 20 кВт	1	14 887,00	14 887,00
Автоматичний вимикач (DC/AC)	2	*	1 899,05
Котельня (8.0 кВт)			188 010,00
ФЕМ JA Solar 400 Вт	20	5200,00	104 000,00
Інвертор Huawei 8 кВт (SUN2000-8KTL-M1)	1	65 295,30	65 295,30
Кабель сил. АВВГ 4x25,0	60	85,24	5 114,40
Щит захисту DC 10 кВт	1	11 916,00	11 916,00
Автоматичний вимикач (DC/AC)	2	*	1 684,10
Складське приміщення для первинної сировини (30.4 кВт)			526 248,12
ФЕМ JA Solar 400 Вт	76	5200,00	395 200,00
Інвертор Huawei 30 кВт (SUN2000-30KTL-M3)	1	111 300,00	111 300,02
Кабель сил. АВВГ 4x25,0	40	85,24	3 409,60
Щит захисту DC 30 кВт	1	14 887,00	14 887,00
Автоматичний вимикач (DC/AC)	2	*	1 451,10
Ділянка сушіння матеріалів (32.0 кВт)			559 092,50
ФЕМ JA Solar 400 Вт	80	5200,00	416 000,00
Інвертор Huawei 25 кВт (SUN2000-25KTL-M5)	1	121 135,00	121 135,00
Кабель сил. АВВГ 4x70,0	25	206,50	5 162,50

Продовження табл.3.9

Об'єкт / Найменування компонента	Кіль- ть, шт/м	Вартість за шт/м, грн	Всього, грн (з ПДВ)
Щит захисту DC 30 кВт	1	14 887,00	14 887,00
Автоматичний вимикач (DC/AC)	2	*	1 908,00
Основний виробничий цех (24.0 кВт)			444 610,14
ФЕМ JA Solar 400 Wp	60	5200,00	312 000,00
Інвертор Huawei 20 кВт (SUN2000-20KTL-M5)	1	105 664,00	105 664,00
Кабель сил. АБВГ 4×120,0	25	367,50	9 187,50
Щит захисту DC 20 кВт	1	14 887,00	14 887,00
Автоматичний вимикач (DC/AC)	2	*	2 871,64
Склад готової продукції (25.6 кВт)			474 405,19
ФЕМ JA Solar 400 Wp	64	5200,00	332 800,00
Інвертор Huawei 25 кВт (SUN2000-25KTL-M5)	1	121 135,00	121 135,00
Кабель сил. АБВГ 4×25,0	45	85,24	3 835,80
Щит захисту DC 30 кВт	1	14 887,00	14 887,00
Автоматичний вимикач (DC/AC)	2	*	1 747,39
Загальносистемні компоненти			682 224,51
Панель Huawei Smart Logger 3000A	1	33 015,00	33 015,00
Багатофункціональний лічильник Janitza	1	17 609,51	17 609,51
Кріплення (баластна система, оцинк. сталь)	356	1600,00	569 600,00
PV кабель КВЕ 6мм ²	1000	62,00	62 000,00
ЗАГАЛЬНА ОБЛАДНАННЯ			3 296 240,46

Загальна вартість обладнання (Собл) для проекту гібридної СЕС становить 3296240,46 грн (з урахуванням ПДВ).

Капітальні витрати (Скап.витрати) є сумарною величиною, що включає вартість основного обладнання, а також витрати на проектування, монтажні та пусконаладжувальні роботи та транспортні витрати.

Ці супутні витрати, як правило, становлять значну частку від загального бюджету. Для укрупненого розрахунку капітальних витрат використовується емпіричний коефіцієнт K , що враховує послуги (монтаж, транспортування, проектні роботи):

$$S_{\text{кап.витрати}} = S_{\text{обл}} \cdot K \quad (3.3)$$

де $K = 1,2$ — значення умовного коефіцієнту, що приймається для оцінки додаткових витрат (20% від вартості обладнання).

$$S_{\text{кап.витрати}} = 3296240,46 \text{ грн} \cdot 1,2 \approx 3955488,55 \text{ грн}$$

Відповідно до розрахунку, загальна сума капітальних інвестицій у створення фотоелектричної системи для промислового об'єкта оцінюється у 3 955 488,55 грн (з ПДВ).

3.5. Визначення показників інвестиційної привабливості та терміну окупності СЕС

Для оцінки економічної доцільності інвестицій у гібридну фотоелектричну систему використовувалися методи аналізу дисконтованих грошових потоків (Discounted Cash Flow, DCF). Розрахунки проводилися в MS Excel із застосуванням ключових фінансових показників.

Річний чистий грошовий потік (CF) визначається як різниця між річною економією (як наслідок заміщення купівлі енергії за тарифом) та експлуатаційними витратами:

$$\text{Річна економія (тис. грн)} = E_{\text{річ}} \cdot T / 1000 = 166086 \cdot 9,38 / 1000 \approx 1557,89 \text{ тис. грн}$$

$$CF_i = \text{Економія}_i - S_{\text{експл}}$$

Таблиця 3.10 - Вхідні дані для фінансового моделювання

Найменування показника	Значення	Одиниця виміру
Капітальні витрати Скап. витрати	3991,49	тис. грн
Річні експлуатаційні витрати (Секспл)	35,00	тис. грн
Річне заощадження енергоресурсів (Еріч)	166086,00	кВт·год
Тариф на ЕЕ (Т)	9,380	грн/кВт·год
Облікова ставка НБУ (ставка дисконтування r)	13	%
Горизонт аналізу (період експлуатації)	20	років
Зал. вартість облад. ($S_{зал}$)	399,15	тис. грн. (10% від Скап)

Для врахування вартості грошей у часі застосовується коефіцієнт дисконтування (k_i) за формулою:

$$k_i = \frac{1}{(1 + r)^i}$$

Результати покрокового розрахунку Чистої поточної вартості (NPV) та визначення терміну окупності представлені у Таблиці 3.10.

Таблиця 3.11 – Розрахунок терміну окупності та показника NPV СЕС (тис. грн)

Рік (i)	Кап. витр.	Експл. витр.	Річна економія	Кум. CF	ki (при $r=13\%$)	NPV (Дисконт. CF)	Кум. диск. CF
0	3991,49	0,00	0,00	-3991,51	1,000	-3991,5	-3991,51
1	-	35,00	1557,9	-2468,62	0,885	1347,7	-2643,82
2	-	35,00	1557,9	-945,73	0,783	1192,6	-1451,22
3	-	35,00	1557,9	577,21	0,693	1055,4	-395,73
4	-	35,00	1557,9	2100,11	0,613	934,0	538,34
5	-	35,00	1557,9	3622,96	0,543	826,6	1364,91
...
19	-	35,00	1557,9	24040,53	0,105	160,5	6424,91
20*	-	35,00	1557,9	25962,53	0,093	179,4	6604,37

*У 20-му році враховано надходження залишкової вартості обладнання (399,15 тис. грн).

Визначення ключових економічних показників

1. Простий термін окупності (PP , без дисконтування) настає, коли кумулятивний грошовий потік (кум. CF) стає позитивним:

$$PP = 2 + \frac{|-945,71 \text{ тис. грн}|}{1522,89 \text{ тис. грн/рік}} \approx 2,62 \text{ років}$$

2. Дисконтований термін окупності (DPP) настає, коли кумулятивний дисконтований грошовий потік (Кум. диск. CF) стає позитивним:

$$DPP = 3 + \frac{|-395,72 \text{ тис. грн}|}{934,01 \text{ тис. грн/рік}} \approx 3,42 \text{ років}$$

3. Чиста поточна вартість (NPV):

Показник NPV , розрахований на горизонті аналізу 20 років, становить 6 604,26 тис. грн (з урахуванням округлень). Позитивне значення NPV свідчить про фінансову привабливість проєкту.

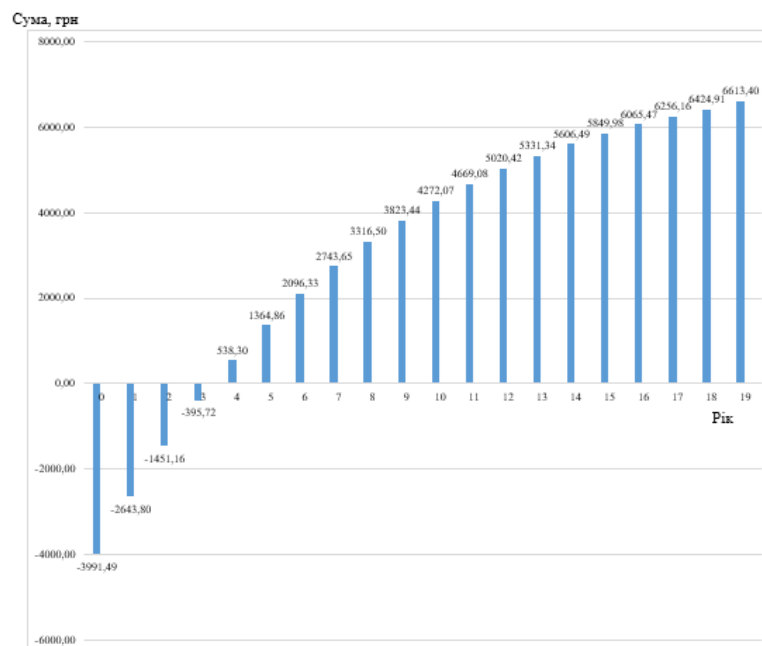


Рисунок 3.39 – Динаміка кумулятивного дисконтованого грошового потоку (рентабельності) СЕС

Діаграма, що ілюструє динаміку Кумулятивного дисконтованого грошового потоку протягом 20-річного періоду, підтверджує рентабельність інвестиції (рис. 3.39).

Отже, термін окупності проєкту (простий) становить 2,63 роки, а дисконтований термін окупності – 3,42 років.

Висновки до розділу 3

У розділі 3 було виконано комплекс інженерних та фінансових розрахунків, що обґрунтовують доцільність впровадження гібридної фотоелектричної системи на промисловому об'єкті:

1. На основі визначеної площі дахів та вимог до генерації розроблено концептуальний проєкт СЕС. Обрано монокристалічні ФЕМ (400 Вт) та трифазні мережеві інвертори Huawei Technologies. Шляхом моделювання в PVsyst підтверджено узгодження параметрів обладнання, а також визначено фінальну встановлену потужність та кількість модулів для кожного з шести об'єктів (загалом 356 шт.).

2. Створено спрощені блок-схеми підключення СЕС для кожної будівлі, що відображають конфігурацію стрінгів (послідовне з'єднання ФЕМ) та їхнє приєднання до інверторів, підтверджуючи технічну реалізованість проєкту.

3. Проведено моделювання річної генерації енергії, яка склала 166 086 кВт год. Сформовано діаграми, які ілюструють сезонну динаміку виробництва електроенергії та її співвідношення із загальним споживанням підприємства.

4. Розрахована загальна вартість обладнання та визначена сума капітальних витрат (3,96 млн грн), що включає вартість монтажних та супутніх робіт.

5. За результатами аналізу дисконтованих грошових потоків встановлено, що проєкт має високі показники інвестиційної привабливості:

- Простий термін окупності: 2,63 років.
- Дисконтований термін окупності: 3,42 років.

- Чиста поточна вартість (NPV): 6,6 млн грн.

Отже, впровадження спроектованої гібридної ФЕС є високоефективним фінансовим та технічним рішенням. Швидкий термін окупності гарантує швидке повернення вкладених коштів та подальше отримання чистого прибутку, а також підвищує енергетичну стійкість підприємства, зокрема в умовах можливих перебоїв в електропостачанні.

РОЗДІЛ 4.

РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

4.1. Мета та завдання реалізації досліджуваної сонячної електростанції (СЕС)

Ключове завдання цього розділу полягає у всебічній оцінці економічної доцільності та ефективності застосування гібридної фотоелектричної системи на об'єкті промислового призначення. Об'єктом, що розглядається в контексті цього дослідження, є промисловий комплекс, для енергозабезпечення будівель якого передбачається використання саме такої гібридної системи.

Вибір гібридної конфігурації сонячних батарей для досліджуваного підприємства обумовлений низкою суттєвих переваг, які були детально проаналізовані у першому розділі. Найважливіші з них:

- Значна економія операційних витрат підприємства, що досягається за рахунок скорочення обсягів закупівлі дорогої електроенергії з централізованої мережі.
- Забезпечення енергетичної незалежності (автономності) роботи, що стає можливим завдяки наявності акумуляторних батарей. Ці накопичувачі здатні зберігати надлишкову електроенергію, вироблену СЕС, та видавати її під час пікового попиту або відсутності зовнішнього живлення.

Зміст даного розділу є логічним продовженням попередніх етапів роботи, де було змодельовано умовне підприємство, здійснено технічний підбір доцільного обладнання та виконано розрахунки терміну окупності системи. Таким чином, основною метою стартап-проєкту є демонстрація та підтвердження економічної ефективності інтеграції гібридної СЕС для потреб промислового суб'єкта.

Таблиця 4.1 – Концептуальне описання та аналіз ідеї стартап-проєкту (ефективність гібридної ФЕС)

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Ключові переваги для користувача
Оцінка ефективності впровадження запропонованої системи	Промислові об'єкти	Самозабезпечення електроенергією з потенціалом генерації прибутку (наприклад, від продажу надлишків)
	Житлові будівлі	Гарантоване постійне електроживлення для власних потреб та можливість отримання доходу за програмою «зеленого тарифу»
	Громадські будівлі	Можливість повного або часткового покриття власного енергоспоживання об'єкту

4.2. Технологічний аудит концепції проєкту

Для успішної реалізації проєкту необхідно провести технологічну оцінку (аудит) пропонованої ідеї, керуючись відповідними методологічними підходами (згідно, наприклад, із джерелом [12]). У табл. 4.2 подано узагальнені результати такого аудиту, які підтверджують технологічну здійсненність проєкту.

Таблиця 4.2 – Технологічні шляхи реалізації концепції проєкту

№	Концепція проєкту	Технологічні шляхи реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Гібридне енергозабезпечення промислових об'єктів за допомогою дахових ФЕС	Встановлення запропонованої системи як джерела живлення, незалежного від загальної енергосистеми	Підтверджена	Висока
2	Гібридне енергозабезпечення промислових об'єктів за допомогою дахових ФЕС	Функціонування СЕС як повністю автономного джерела електроенергії	Підтверджена	Висока

Продовження табл.4.2

№	Концепція проєкту	Технологічні шляхи реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
3	Можливість автономної роботи джерела електроенергії	Застосування акумуляторних систем для накопичення та резервного живлення	Підтверджена	Висока

Обрана технологія реалізації продукту полягає у впровадженні гібридної сонячної електростанції, яка слугуватиме первинним та резервним джерелом електроенергії для підприємства, що функціонує незалежно від централізованої енергомережі.

Встановлення такої гібридної СЕС має значний перелік переваг. Однією з ключових є гарантія безперервності виробничих процесів, оскільки об'єкт отримує енергетичну незалежність від зовнішніх чинників – чи то проведення ремонтних робіт у центральній мережі, чи застосування графіків планових/аварійних відключень. Підприємство, що має власну генеруючу потужність, зможе працювати безперебійно.

Крім того, розрахунки, проведені в третьому розділі, підтвердили високу економічну привабливість проєкту. Зокрема, було встановлено короткий термін повернення вкладених інвестицій – всього 4 роки. Це свідчить про те, що СЕС почне генерувати чистий прибуток для підприємства вже через відносно невеликий проміжок часу.

4.3. Аналіз ринкових перспектив запуску стартап-проєкту

Для успішного виведення стартап-проєкту на ринок критично важливо попередньо ідентифікувати та оцінити ринкові можливості та потенційні загрози, що можуть негативно вплинути на його реалізацію. Цей комплексний аналіз дає змогу визначити найбільш ефективні стратегічні напрямки впровадження, враховуючи наявне конкурентне середовище та реальні потреби потенційних споживачів.

Першим етапом є аналіз ринкового попиту, який охоплює оцінку обсягу ринку, динаміки його розвитку та ступеня наявності стійкого попиту на гібридні фотоелектричні системи.

Таблиця 4.3 – Попередня оцінка потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники ринкового середовища	Характеристика та стан
1	Орієнтовна кіл-ть ключових суб'єктів, од.	1000,0
2	Загальний обсяг продажів (частка ринку)	СЕС становлять до 75% від усіх об'єктів ВДЕ
3	Динаміка розвитку ринку (якісна оцінка)	Стрімке зростання
4	Існуючі бар'єри для входу	Ризик виникнення дугових замикань при експлуатації великомасштабних систем
5	Особливості сертифікації та стандартизації відповідно до законодавчих норм	ІЕС 61215 ІЕС 62716 ІЕС 61730
6	Середня рентабельність у галузі (термін окупності)	Для домашніх СЕС (до 50 кВт) термін окупності може становити від 5 до 7 років (або оптимістично 4-5 років); для великих станцій (від 1 МВт) — 6-8 років.

Аналіз даних табл. 4.3 підтверджує, що сонячна енергетика є високоперспективним сектором в енергетичній сфері. Враховуючи державні програми стимулювання для населення, які не вимагають значних початкових капіталовкладень, основна стратегічна мета — прискорення переходу до використання ВДЕ для виробництва електроенергії.

Таким чином, ринок впровадження сонячної енергетики є надзвичайно привабливим для інвестування. Державні ініціативи, як-от механізм «зеленого тарифу» чи програми пільгового кредитування на придбання обладнання для чистої генерації, виступають потужними каталізаторами для реалізації даного стартап-проекту.

Наступний необхідний крок — ідентифікація потенційних клієнтських груп, їхніх ключових характеристик та формування орієнтовного переліку вимог до пропонованого продукту (гібридної СЕС) для кожного сегмента.

Таблиця 4.4 – Характеристики потенційних клієнтів для стартап-проекту

№	Основна потреба, яка дозволяє знайти споживачів	Цільовий сегмент	Відмінності у поведінці цільових Груп	Специфічні вимоги споживачів до продукту
1	Висока вартість централізованої електроенергії	Населення, промислові об'єкти, громадські споруди	Цільові сегменти, які прагнуть мінімізувати обсяги споживання дорогої мережевої електроенергії	Ключова вимога: Максимальна економія операційних коштів (зниження рахунків).
2	Нестабільність енергосистеми (перебої)	Населення, промислові об'єкти, громадські споруди	Споживачі, які бажають використовувати гібридну СЕС як надійне основне або резервне джерело живлення	Ключова вимога: Гарантована здатність установки автономно працювати під час відключень, аварій чи ремонтних робіт у загальній мережі.

Після сегментації клієнтів необхідно провести детальний аналіз зовнішнього ринкового середовища. Цей аналіз включає ідентифікацію факторів, які сприятимуть успішному впровадженню проекту (можливості), і тих, що можуть створити загрозу його реалізації (ризики).

Таблиця 4.5 – Аналіз факторів загроз

№	Фактор загрози	Зміст потенційної загрози	Можлива реакція компанії (Мінімізація)
1	Тривалий термін повернення капіталовкладень	Неповернення інвестицій протягом тривалого періоду.	Розробка чіткої фінансової моделі та інформування клієнтів про гарантовану окупність.
2	Низька окупність	Ризик відсутності очікуваної економії коштів на електроенергії.	Технічне обґрунтування та гарантування мінімального терміну окупності (через якісне проєктування).
3	Скасування державних стимулюючих програм	Збільшення фінансового навантаження на кінцевого споживача.	Акцентування уваги на автономності та екологічності як основних перевагах, незалежних від програм.
4	Ракетна/військова загроза	Можливе пошкодження елементів установки уламками або прямою атакою.	Пропонування страхування обладнання та використання стійких, модульних конструкцій.

Таблиця 4.6 – Аналіз факторів можливостей

№	Фактор можливості	Зміст потенційної Можливості	Реакція компанії (Використання можливості)
1	Автономна енергосистема	Можливість генерації електроенергії при відключеннях, аварійних ситуаціях чи кризових періодах.	Активне просування переваг енергетичної стійкості та незалежності.
2	Державна підтримка ВДЕ	Сприятливі умови для розвитку чистої енергетики, що знижує навантаження на центральну мережу.	Максимальне використання та консультування клієнтів щодо наявних програм та пільг.
3	Заощадження коштів	Реальна можливість для населення та підприємств суттєво зменшити свої рахунки за енергоспоживання.	Демонстрація фінансової вигоди (розрахунки ROI та терміну окупності) як головного стимулу.

Для повноцінного аналізу конкурентного середовища доцільно провести SWOT-аналіз, який систематизує внутрішні (сильні та слабкі сторони) та зовнішні (можливості та загрози) чинники для досліджуваного проєкту.

Таблиця 4.7 – Результати SWOT-аналізу критеріїв стартап-проєкту

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
* Використання чистого, екологічного джерела енергії.	* Високі початкові капіталовкладення.
* Здатність системи працювати в умовах відсутності мережевого живлення.	* Проблема утилізації виведених з експлуатації компонентів СЕС.
* Забезпечення повної автономності або резервування роботи.	* Залежність ефективності від метеорологічних умов (інсоляції).
Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
* Сприяння зниженню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище.	* Ризик пошкодження обладнання внаслідок ракетної/військової загрози.
* Можливість інтеграції нових, більш ефективних технологій виробництва енергії.	* Домінування та велика частка використання традиційних джерел енергії.
* Підтримка з боку державних програм та ініціатив.	* Експлуатаційні небезпеки та ризики, пов'язані з роботою високовольтної СЕС.

4.4. Формування ринкової стратегії проєкту

Розробка ринкової концепції розпочинається з визначення стратегії охоплення ринку (маркетингового покриття). Цей процес вимагає детального опису цільових сегментів потенційних споживачів та оцінки їхньої реакції на пропонований продукт. У табл. 4.8 наведено результати аналізу ключових груп, що мають найбільший потенціал для впровадження гібридної ФЕС.

Таблиця 4.8 – Критерії вибору цільових сегментів потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи	Сприйнятливість споживачів до продукту	Очікуваний попит у сегменті	Складність входу в сегмент	Інтенсивність конкуренції
1	Промислові об'єкти (індустріальний сектор)	Висока, споживачі демонструють готовність до модернізації	Стійко зростаючий	Середня	Помірна
2	Приватні домогосподарства (житловий сектор)	Висока, споживачі зацікавлені в економії та автономії	Динамічно зростаючий	Середня	Помірна
3	Громадські споруди (муніципальний, комерційний сектор)	Висока, споживачі прагнуть покриття власного споживання	Стабільний	Середня	Помірна

На підставі результатів дослідження потенційних споживчих груп було прийнято рішення про фокусування стартап-проекту на таких цільових сегментах: промислові об'єкти та приватні забудови.

З огляду на необхідність задоволення різних потреб і вимог цих двох ключових груп, була обрана стратегія диференційованого маркетингу. Ця стратегія передбачає розробку окремих маркетингових програм і пропозицій для кожного цільового сегменту.

4.5. Розробка програми стартап-проекту

Для формування маркетингової концепції продукту та визначення цінності, яку отримає кінцевий споживач, необхідно підсумувати результати попереднього аналізу його конкурентоспроможності. Ключові переваги гібридної ФЕС систематизовані у табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Перелік ключових переваг концепції потенційного продукту

№	Базова потреба споживача/суспільства	Основна вигода, яку надає товар	Унікальні конкурентні переваги (УКП)
1	Вимога до екологічної чистоти джерел енергії	Відсутність викидів у навколишнє середовище	Поліпшення стану атмосферного повітря та внесок у зменшення поширення «парникового ефекту».
2	Потреба в економії коштів на енергоносії	Використання сонячної енергії дозволяє істотно зменшити рахунки на ЕЕ	Енергетична автономність
3	Забезпечення сталості енергопостачання	Сонячна енергія є невичерпним відновлюваним джерелом енергії.	Простота та низька вартість регулярного технічного обслуговування системи.

Висновки до розділу 4

У межах четвертого розділу успішно здійснено комплексну розробку стартап-проекту щодо впровадження гібридної фотоелектричної системи для промислового об'єкта, охопивши всі ключові аспекти виведення інноваційного продукту на ринок.

1. Визначено, що основна мета стартапу полягає в дослідженні та підтвердженні економічної ефективності інтеграції гібридної СЕС для промислових потреб. Ключовими напрямками застосування визначено промислові об'єкти та приватні домогосподарства, а головною перевагою для користувача є енергетична автономність та можливість отримання прибутку (через економію та "зелений тариф").

2. Проведений технологічний аудит підтвердив наявність та доступність усіх необхідних технологій для реалізації проекту. В якості основи обрано гібридну СЕС, яка функціонуватиме як незалежне джерело електроенергії, забезпечуючи безперебійність роботи об'єкта навіть за умов відключень у централізованій мережі.

3. Аналіз ринкових можливостей засвідчив, що сонячна енергетика є динамічно зростаючим та інвестиційно привабливим сектором. Цьому сприяють державні стимули ("зелений тариф", програми кредитування) та високий попит, сформований потребами в економії коштів та забезпеченні стійкості енергопостачання.

4. Ідентифіковано цільові сегменти (промисловість та приватний сектор) та обрано стратегію диференційованого маркетингу для ефективного охоплення ринку.

5. Сформовано маркетингову концепцію, що базується на унікальних конкурентних перевагах продукту: екологічність (чисте джерело енергії), автономність (незалежність від загальної мережі) та фінансова вигода (суттєва економія на рахунках).

Розробка стартап-проєкту підтверджує, що впровадження гібридної фотоелектричної системи є технологічно здійсненним та має значний ринковий потенціал, що робить його перспективним інвестиційним рішенням.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційну роботу присвячено дослідженню та оцінці ефективності впровадження гібридної фотоелектричної системи електропостачання для промислового об'єкта. У процесі виконання роботи було досягнуто поставленої мети та отримано такі ключові результати:

1. Аналіз тенденцій розвитку енергосистем засвідчив, що сонячна енергетика є найбільш перспективним напрямком, критично важливим в умовах енергетичної нестабільності та зростання цін на традиційні енергоносії. Обґрунтовано вибір саме гібридної конфігурації СЕС. Ця система, на відміну від мережевої, здатна забезпечити енергетичну автономність промислового підприємства та безперебійність виробничих процесів, що є ключовою перевагою для критичної інфраструктури.

2. На основі аналізу умовного промислового об'єкта було змодельовано річний графік енергоспоживання з урахуванням сезонних коливань, що дозволило максимально точно визначити необхідну потужність системи.

3. За допомогою програмного забезпечення PVsyst та розрахунків було визначено оптимальну кількість фотоелектричних панелей та скориговано їхнє розміщення, забезпечивши максимальну генерацію з урахуванням площі дахів.

4. Проведені розрахунки підтвердили високу економічну ефективність проєкту. Було встановлено короткий термін окупності капітальних інвестицій, який становить 2,6 роки.

5. Моделювання рентабельності показало, що гібридна СЕС починає генерувати чистий прибуток і повністю покриває початкові вкладення вже на четвертий рік експлуатації. Це робить проєкт високорентабельним для інвесторів.

6. Аналіз ринку підтвердив, що проєкт має значний потенціал завдяки зростаючому попиту на автономні та екологічні джерела енергії, підтриманому державними програмами стимулювання ВДЕ.

7. Розроблено стратегію диференційованого маркетингу, сфокусовану на двох ключових сегментах: промислових підприємствах (потреба в безперебійності) та приватних домогосподарствах (потреба в економії).

Отже, впровадження гібридної фотоелектричної системи електропостачання для промислового об'єкта є технічно обґрунтованим, економічно виправданим та має значні ринкові перспективи. Реалізація проекту сприятиме підвищенню енергетичної стійкості об'єкта, зниженню його операційних витрат та підтримці загальнодержавної стратегії переходу до чистих джерел енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A user guide to simple monitoring and sustainable operation of PV-diesel hybrid systems. — IEA PVPS Task 9 Report T9-16:2015. — Paris : IEA, 2015. — Available at: <https://iea-pvps.org>
2. Solar for Industrial Process Heat — Energy Systems Analysis. — Golden, CO : NREL, 2023. — Available at: <https://www.nrel.gov/>.
3. Renewables 2024. Global status report. Energy demand. URL: https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/energy_demand.
4. Renewables 2024. Global status report. Energy supply. URL: https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/energy_supply/01_global_trends.
5. Мисак, С. Й., & Шаповал, С. П. (2025). Розроблення гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора та аналіз його ефективності. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, 15(1), 181-191. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-21>
6. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/LEDS_ua_last.pdf.
7. Сегеда М. С., Олійник М. Й., Дудурич О. Б. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії. Навч. посіб. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2019. 204 с. 22. Сиротюк С. В. Проектування і обслуговування сонячних систем електропостачання. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи з дисципліни "Проектування і обслуговування систем відновлюваної енергетики" для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Львів : ЛНУП, 2021. 32 с.
8. Шавьолкін О. О., Підгайний М. О., Становський Є. Ю. Моделювання гібридної фотоелектричної системи з акумуляторною батареєю для локального об'єкту у разі енергоменеджменту з використанням прогнозу. Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №1(24)'2021 УДК 620. 92 : 621.314/. 572 <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2021-1-6-13>

9. Оптимізація структури та режимів роботи гібридних сонячно-вітряних електростанцій промислових об'єктів / В. М. Кухарчук, Г. В. Мацюк // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Технічні науки. – 2022. – Вип. 367. – С. 175–185. – Режим доступу: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/nauk_visnyk/nv_367/367_175.pdf.

10. ThinkGeoEnergy's Top 10 Geothermal Countries 2023 – Power Generation Capacity. Think GeoEnergy - Geothermal Energy News. – Режим доступу: <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2023-power-generation-capacity/>.

11. Будівництво промислових сонячних електростанцій СЕС. Структурм. – Режим доступу: <https://structum.ua/services/renewable-energy/solar-power/>.

12. Гарантія на сонячні панелі: що це та для чого | SmartEcoLLC. SmartEco LLC. – Режим доступу: <https://smarteco.biz.ua/blog/korysno-znaty/garantiya-na-sonyachni-paneli-shho-cze-ta-dlya-chogo/>.

13. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 (Звіт). – Режим доступу: https://energytransition.in.ua/wp-content/uploads/2018/11/Perehid-Ukrainy-na-vidnovlyuvanu-energetuku-do-2050_zvit.pdf (Дата звернення: 28 листопада 2024).

14. Сонячна генерація: змінюються масштаб та географія об'єктів. Українська Енергетика. – Режим доступу: <https://ua-energy.org/uk/posts/tryfonivska-ses-foto-dtek>.

15. Solar energy and the environment. U.S. Energy Information Administration (EIA). – Режим доступу: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-energy-and-the-environment.php>.

16. Проектно-орієнтований підхід до оцінювання ефективності впровадження гібридних енергетичних систем / О. О. Сясько, О. П. Левицька // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2023. – № 1(5). – С. 56–63. – Режим доступу: <https://doaj.org/article/57a7e8b6b231454580e556b19a71d643>.

17. Облікова ставка національного банку. Національний банк України. – Режим доступу: <https://bank.gov.ua/ua/monetary/archive-rish> (Дата звернення: 15 листопада 2025).

18. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Черкаси: видавець Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.

19. Енергетичний менеджмент : підручник / А. В. Праховник та ін. ; за ред.: А. В. Праховника, О. М. Ращенко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 420 с.

20. Енергетичний менеджмент: навч. посіб. / [Г. Б. Варламов, С. С. Мосолов, О. Б. Яцун та ін.] ; М-во освіти і науки України, НТУУ "КПІ". – Київ: Політехніка, 2021. – 412 с.

21. Кваліфікаційна робота магістра: метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.]; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький: ЦНТУ, 2023. - 74 с. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/13066>.

22. Економічна оцінка ефективності інвестицій у відновлювану енергетику в Україні / В. С. Білоусова // Економіка та держава. – 2024. – № 2. – С. 36–41. – Режим доступу: http://www.economyandsociety.in.ua/journal/2_2024/7.pdf.

23. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії: постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 312 (зі змінами). – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/312-2018-%D0%BF#Text>.

ДОДАТКИ

Додаток А. Охорона праці

А.1. Загальні положення

При проектуванні, монтажі та експлуатації гібридних фотоелектричних систем електропостачання особлива увага приділяється питанням охорони праці. Основними завданнями охорони праці є забезпечення безпечних умов роботи персоналу, попередження травматизму та професійних захворювань, а також збереження працездатності обладнання.

Досліджувана гібридна фотоелектрична система включає фотоелектричні панелі, акумуляторні батареї, інвертори та системи управління, тому потенційними небезпеками для персоналу є:

- ураження електричним струмом високої напруги;
- пожежа та вибух при неправильній експлуатації акумуляторних батарей;
- падіння з висоти при монтажі панелей;
- механічні пошкодження під час монтажу та обслуговування;
- вплив сонячної радіації та погодних умов.

А.2. Нормативна база охорони праці

Для організації безпечних робіт застосовуються такі основні нормативні документи:

- Закони та постанови України, що регулюють охорону праці, електробезпеку та промислову безпеку;
- ДСТУ EN 62446-1:2017 – вимоги до проектування, монтажу та перевірки фотоелектричних систем;
- Правила безпеки при експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС);
- Державні санітарні норми щодо робочого середовища та факторів впливу сонячної радіації.

Дотримання нормативної бази забезпечує зниження ризиків травматизму та аварій, а також гарантує ефективну та безпечну роботу персоналу.

А.3. Оцінка ризиків та заходи безпеки

А. 3.1. Електробезпека

При роботі з фотоелектричними панелями та інверторами необхідно:

- використовувати засоби індивідуального захисту (ізолюючі рукавиці, каски, взуття з діелектричною підошвою);
- перевіряти справність обладнання та проводки перед початком робіт;
- дотримуватися режиму вимкнення живлення під час монтажу або обслуговування;
- забезпечувати заземлення металевих конструкцій системи.

А.3.2. Пожежна безпека

Для запобігання пожежам і вибухам:

- акумуляторні батареї встановлюються у вентиляованих приміщеннях;
- забороняється зберігати легкозаймисті матеріали поруч із батареями;
- на місці монтажу та експлуатації передбачаються вогнегасники та системи аварійного відключення.

А. 3.3. Роботи на висоті

При монтажі панелей на дахах та конструкціях:

- обов'язкове використання страхувальних поясів та огорожень;
- персонал повинен пройти інструктаж з безпечного виконання робіт на висоті;
- не рекомендується працювати за несприятливих погодних умов (вітер, дощ, ожеледь).

А. 3.4. Механічна безпека

Використання спеціалізованого інструменту та механізованих засобів для переміщення панелей;

Організація робочого місця з мінімізацією ризику падіння предметів;

Контроль технічного стану монтажного обладнання.

А. 4. Організаційні заходи

Для забезпечення охорони праці на підприємстві впроваджуються такі організаційні заходи:

- проведення інструктажів з охорони праці перед початком робіт;
- періодичне навчання персоналу з правил електробезпеки та пожежної безпеки;
- призначення відповідальних осіб за охорону праці та контроль виконання вимог безпеки;
- регулярна перевірка та технічне обслуговування обладнання системи.

А.5. Розрахунок заземлення фотоелектричної системи

Для забезпечення електробезпеки необхідно організувати заземлення металевих конструкцій фотоелектричних панелей, інвертора та акумуляторного обладнання.

Вихідні дані для розрахунку:

- Напруга системи: $U=380$ В (трифазна)
- Допустимий опір заземлення: $R_z \leq 4$ Ω
- Тип ґрунту: глинистий, питомий опір $\rho=100$ $\Omega \cdot \text{м}$
- Кількість вертикальних електродів: 3 шт.
- Довжина кожного електрода: $L=3$ м
- Діаметр електрода: $d=0.015$ м

Опір одного вертикального електрода визначається за формулою:

$$R_{\text{в}} = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \left[\ln \frac{2L}{d} - 1 \right]$$

Підставимо значення:

$$R_{\text{в}} = \frac{100}{2\pi \cdot 3} \cdot \left[\ln \frac{2 \cdot 3}{0.015} - 1 \right]$$

$$2\pi \cdot 3 \approx 18.85$$

$$\frac{100}{18.85} \approx 5.31$$

$$\frac{2L}{d} = \frac{6}{0.015} = 400$$

$$R_{\text{в}} = 5.31 \cdot 4.991 \approx 26.5 \Omega$$

Якщо електроди з'єднані між собою горизонтальним проводом (шина або смуга), ефективний опір зменшується приблизно за формулою:

$$R_{\text{зар}} = \frac{R_{\text{в}}}{n \cdot k}$$

де $n=3$ — кількість електродів,

k — коефіцієнт взаємного розташування (для трикутника $k \approx 1.2$).

$$R_{\text{зар}} = \frac{26.5}{3 \cdot 1.2} \approx \frac{26.5}{3.6} \approx 7.36 \Omega$$

Примітка: Для досягнення нормативного опору $R_{\text{з}} \leq 4$ Ом необхідно або збільшити кількість електродів, або поглибити їх занурення, або використовувати горизонтальні заземлюючі смуги для зменшення опору.

Висновки

Дотримання заходів охорони праці при проектуванні, монтажі та експлуатації гібридної фотоелектричної системи є обов'язковим для забезпечення безпечних умов праці. Це дозволяє знизити ризик нещасних випадків та аварій, підвищити надійність електропостачання промислового об'єкта та ефективність використання відновлюваних джерел енергії.

Для забезпечення ефективного та безпечного заземлення гібридної фотоелектричної системи рекомендується:

1. Використати 4–5 вертикальних електродів довжиною 3–3,5 м, з'єднаних горизонтальною смугою;
2. Матеріал електродів — сталь із покриттям для запобігання корозії;
3. Контролювати опір заземлення після монтажу і при експлуатації;
4. Додатково застосовувати потенційну вирівнювальну шину для з'єднання металевих конструкцій системи.