

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

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і
енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Каплун В.В./
(підпис)

_____ /Антипов Є.О./
(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

« _____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Обґрунтування системи електропостачання офісно-виробничої будівлі з використанням інтегрованої сонячної електростанції»

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

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

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

Гарант освітньої програми

Доцент, кандидат технічних наук _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Доцент, кандидат технічних наук _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Петренко А.В.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Назаренко В.В.
(ПІБ)

КИЇВ – 2025

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

к.т.н доцент _____ Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ІПБ)
« ____ » _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Назаренко Владислав Валентинович
(прізвище, ім'я, по батькові)

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

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

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

Тема магістерської роботи **«Обґрунтування системи електропостачання офісно-виробничої будівлі з використанням інтегрованої сонячної електростанції»** затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2061 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 1.11.2025 р.
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи ПУЕ, ДБН, ДНАОП, ГКД, ситуаційний план місцевості з геолокацією, архітектурний план будівлі, каталоги виробників обладнання

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналітичний огляд існуючих систем електроживлення з відновлюваними джерелами енергії.
2. Характеристика домогосподарства, як об'єкта електроживлення.
3. Розробка схеми електроживлення з відновлюваними джерелами енергії.
4. Обґрунтування системи електроживлення та визначення її ефективності
5. Техніко-економічне обґрунтування прийнятих рішень
6. Заходи з охорони праці та техніки безпеки

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

Дата видачі завдання «18» Листопада 2024 р.

Керівник магістерської роботи _____
Завдання прийняв до виконання _____

Петренко А.В.
Назаренко В.В.

РЕФЕРАТ

Робота викладена на 20 сторінках, містить 20 рисунків, 20 таблиць, 20 додатків та список із 20 використаних джерел.

Актуальність теми – в умовах зростання цін на енергоносії та необхідності підвищення енергетичної безпеки, впровадження гібридних сонячних електростанцій набуває критичного значення для комерційних об'єктів. Це дозволяє не лише забезпечити стабільне електропостачання, але й суттєво знизити експлуатаційні витрати та підвищити енергетичну незалежність підприємств.

Метою роботи є підвищення ефективності електропостачання офісно-виробничої будівлі шляхом використання інтегрованої гібридної сонячної електростанції.

Для досягнення поставленої мети було виконано такі завдання: проаналізовано вплив кліматичних умов розташування та параметрів навантаження будівлі на роботу системи; обрано та обґрунтовано ключові компоненти СЕС; розроблено електричні схеми та змодельовано режими роботи станції; проведено техніко-економічне обґрунтування проєкту для підтвердження його доцільності.

Об'єкт дослідження – параметри інтегрованої гібридної сонячної електростанції.

Предмет дослідження – вплив параметрів навантаження та розташування будівлі на роботу інтегрованої гібридної сонячної електростанції.

У роботі спроектовано гібридну сонячну електростанцію встановленою потужністю 120,75 кВт. Встановлено, що прогнозований річний виробіток електроенергії становить 108435 кВт·год, що дозволяє покривати близько 39,23% річних потреб будівлі. Техніко-економічний аналіз показав, що при капітальних витратах у 2243769 грн та щорічній економії у 468609,20 грн, термін окупності проєкту становить приблизно 5,03 роки. Позитивне значення чистої теперішньої вартості у 1805725,67 грн підтверджує високу економічну ефективність та інвестиційну привабливість проєкту.

Розроблені проєктні рішення можуть бути використані для практичного впровадження гібридних СЕС на об'єктах аналогічного типу, що сприятиме підвищенню їх енергетичної незалежності та зниженню експлуатаційних витрат.

Ключові слова: Гібридна сонячна електростанція, фотоелектричні модулі, інвертор, акумуляторна батарея, енергетична ефективність, власне споживання, термін окупності, NPV.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТЧАННЯ ТА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	11
1.1. Стан та перспективи використання сонячної енергетики для електропостачання комерційних об'єктів	11
1.2. Класифікація та аналіз основного обладнання сонячних електростанцій.....	15
1.3. Огляд типових схемних рішень інтеграції СЕС у системи електропостачання будівель	20
1.4. Постановка мети та завдань дослідження	24
Висновки по розділу.....	25
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОФІСНО-ВИРОБНИЧОЇ БУДІВЛІ ЯК ОБ'ЄКТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	27
2.1. Аналіз місця розташування об'єкта та кліматичних даних	27
2.2. Розрахунок електричних навантажень та побудова графіків споживання електроенергії.....	30
2.3. Визначення потенціалу сонячної генерації на основі даних по інсоляції.....	34
Висновки до розділу 2	38
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ІНТЕГРОВАНОЮ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ	40
3.1. Обґрунтування вибору типу СЕС (мережева, гібридна).....	40
3.2. Розрахунок потужності та вибір конкретних моделей ФЕМ, інвертора та АКБ	43
3.3. Розробка принципової однолінійної схеми електропостачання.....	49
Висновки до розділу 3	51

РОЗДІЛ 4 ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ	53
4.1. МОДЕЛЮВАННЯ СПІЛЬНОЇ РОБОТИ СЕС ТА ЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ МЕРЕЖІ.....	53
4.2. РОЗРАХУНОК РІЧНОГО ВИРОБІТКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СЕС	60
4.3. РОЗРАХУНОК ВЛАСНОГО СПОЖИВАННЯ БУДІВЛІ ТА ЧАСТКИ ПОКРИТТЯ ЙОГО СЕС	64
Висновки до розділу 4	66
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ	68
5.1. РОЗРАХУНОК КАПІТАЛЬНИХ ВИТРАТ	68
5.2. РОЗРАХУНОК ЩОРІЧНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ	71
5.3. РОЗРАХУНОК ЩОРІЧНОЇ ЕКОНОМІЇ.....	72
5.4. РОЗРАХУНОК ТЕРМІНУ ОКУПНОСТІ ТА ІНШИХ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ..	73
Висновки до розділу 5	77
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.....	79
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	82
КАРТКА ОБЛІКУ ВИКОРИСТАННЯ СТАНДАРТІВ ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84
ДОДАТКИ.....	87
Додаток А СПЕЦИФІКАЦІЯ НА СОНЯЧНІ МОДУЛІ JKM575N-72HL4-V N-TYPE TIGER NEO MODULE	87

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АВР – автоматичне вмикання резерву;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВЕУ – вітроенергетична установка;

ДЕС – дизель-електрична станція;

СЕ – сонячний елемент;

СЕС – сонячна електростанція;

ФЕП – фотоелектрична панель;

ВСТУП

У сучасних умовах глобальних кліматичних змін, загострення екологічної ситуації та вичерпності традиційних джерел енергії все більше уваги приділяється розробці та впровадженню енергоефективних рішень з використанням відновлюваних джерел енергії. За останнє десятиліття сонячна енергетика зробила суттєвий крок уперед як у плані технологій, так і в економічній доцільності. Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства, сонячна енергія посідає одне з провідних місць серед усіх альтернативних джерел енергії у світі, демонструючи стабільне зростання встановлених потужностей та зниження собівартості. В Україні спостерігається аналогічна динаміка: обсяги встановлених потужностей сонячних електростанцій постійно збільшуються, особливо у приватному секторі та малому і середньому бізнесі, що свідчить про зростаюче розуміння переваг децентралізованої генерації.

Офісно-виробничі будівлі, як комплексні об'єкти зі змішаним типом навантаження, споживають значні обсяги електроенергії, що є суттєвою статтею їхніх операційних витрат. Основні витрати припадають на забезпечення роботи комп'ютерної та офісної техніки, потужних систем вентиляції та кондиціонування повітря, насосного обладнання, а також на електричне опалення та гаряче водопостачання. Ключовою особливістю таких об'єктів є те, що пік їхнього енергоспоживання часто припадає саме на денні години, що ідеально збігається з періодом максимальної генерації сонячної електростанції. Це створює високий потенціал для впровадження фотоелектричних систем з метою оптимізації експлуатаційних витрат та підвищення енергетичної незалежності бізнесу.

В умовах нестабільності централізованого електропостачання, викликаній, зокрема, об'єктивними геополітичними факторами та зношеністю

інфраструктури, гібридні сонячні електростанції набувають додаткової актуальності. Вони дозволяють не лише знизити залежність від мережі та оптимізувати витрати, але й забезпечити резервне живлення критично важливого обладнання під час перебоїв, що є вкрай важливим для безперервності бізнес-процесів. Зростаюча вартість електроенергії в Україні, а також державна політика щодо підтримки «зелених» технологій та програми енергозбереження, створюють сприятливі економічні та регуляторні умови для впровадження фотоелектричних систем у бізнес-проекти. Враховуючи ці чинники, вибір теми магістерської роботи є надзвичайно актуальним як з науково-технічної, так і з практичної точки зору, оскільки вона дозволяє комплексно вирішити низку проблем, пов'язаних з енергозабезпеченням комерційних об'єктів.

Метою роботи є підвищення ефективності електропостачання офісно-виробничої будівлі шляхом використання інтегрованої гібридної сонячної електростанції.

Об'єкт дослідження: параметри інтегрованої гібридної сонячної електростанції.

Предмет дослідження: вплив параметрів навантаження та розташування будівлі на роботу інтегрованої гібридної сонячної електростанції.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

1.1. Стан та перспективи використання сонячної енергетики для електропостачання комерційних об'єктів

На сьогодні однією з провідних галузей вважається відновлювана енергія. Альтернативні джерела енергії є перевагою для тих країн, які вміють нею користуватися, а також способом зменшення енергетичної залежності. Завдяки впровадженню сучасних технологій у виробництво енергії, це дає змогу знизити собівартість зеленої електроенергії порівняно з іншими, навіть з атомними станціями [1].

Альтернативні або невичерпні енергоресурси – це потоки енергії, які постійно або періодично діють у навколишньому середовищі. У загальному потоки альтернативних джерел енергії можна розділити на дві групи:

- пряма енергія сонячного випромінювання;
- вторинні прояви енергії сонячного випромінювання у вигляді енергії вітру, гідроенергії, теплової енергії навколишнього середовища, енергії біомаси [6].

Основною перевагою щодо використання альтернативних джерел енергії є її екологічна чистота та невичерпність, що сприятиме поліпшенню навколишнього середовища, а також не призведе до змін енергетичного балансу на планеті. Також при використанні альтернативних джерел енергії зникає необхідність у переробці, видобуванні, збагаченні та транспортуванні палива, яке не потрібно утилізувати, на відміну від традиційних видів енергетичних виробництв [1].

За даними Міжнародної енергетичної асоціації, до 2025 року частка ВДЕ у світовому виробництві електроенергії зросте з 29 до 35%. В результаті частка

вугільної і газової генерації скоротиться. Те ж саме станеться й з глобальними викидами CO₂ в енергетичному секторі. За даними МЕА, на Китай припадатиме майже половина додаткової генерації з ВДЕ, за ним слідує Європейський союз з 15% [12].

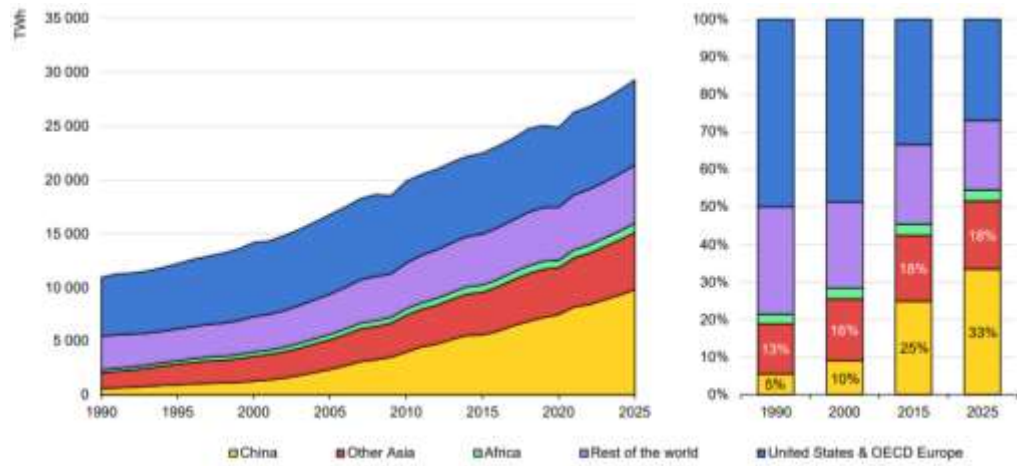


Рис.1.1. Зміна світового попиту на електроенергію за регіонами (зліва) та частки регіонів (справа), 1990–2025

Сонячна енергія — найбільш доступне джерело відновлюваної енергії. Вона широко застосовується в Європі, США, Азії. В Україні найбільший потенціал мають південні та центральні області. Середньорічна інсоляція варіюється в межах 1000–1400 кВт·год/м². Сучасні сонячні електростанції поділяються на геліосистеми для нагріву води та фотоелектричні установки [1]. Перешкодами на шляху використання енергії сонця є необхідність великих ділянок для розміщення наземних установок, а також коливання потужності залежно від географічної широти та погодних умов [3]. Однак сонячні установки можуть ефективно розміщуватись на дахах та фасадах будівель, що є ключовою перевагою для комерційних об'єктів, таких як офісно-виробничі будівлі [2].

Ключовими перевагами, що роблять СЕС особливо привабливими для бізнесу, є їхні низькі експлуатаційні витрати та мінімальні потреби в обслуговуванні. Після встановлення основного обладнання система практично не потребує витрат на паливо чи постійні розхідні матеріали, а відсутність рухомих елементів у фотоелектричних модулях значно знижує ризик механічного зносу. Високий рівень автоматизації та інтеграція цифрових систем моніторингу дозволяють у режимі реального часу контролювати всі показники роботи обладнання та оперативно діагностувати будь-які відхилення. За рахунок постійного зростання тарифів на електроенергію, середній термін окупності сучасних СЕС становить 5–7 років, після чого система генерує практично безкоштовну енергію ще протягом щонайменше 15 років. Найголовніше, власна генерація забезпечує підприємству енергетичну незалежність, знижуючи залежність від коливань тарифів, перебоїв у централізованій мережі та інших економічних ризиків.

Вітрова енергія – це друга за значущістю галузь відновлюваних джерел енергії. Енергія вітру створюється з кінетичної енергії вітру за допомогою вітрових турбін. Величезною перевагою даних установок є те, що вони не забруднюють навколишнє середовище. В Україні найбільш перспективними регіонами для енергії вітру слугують Карпатські гори та прибережні зони. Однак для офісно-виробничої будівлі, що зазвичай розташована в межах міста або промислової зони, цей варіант є непрактичним через потребу у великому вільному просторі та потенційне шумове навантаження.

Геотермальна енергія використовує тепло земних надр. Тепло термальних вод можна перетворювати на електроенергію за допомогою турбогенераторів. Ефективно цей вид відновлювальної енергії застосовується в Ісландії, Японії, Італії. В Україні цей ресурс має обмежене поширення через геологічні умови [1, с. 142]. Таким чином, через жорстку географічну прив'язку до термальних

джерел, цей вид енергії не може вважатися універсальним рішенням для електропостачання комерційних будівель у більшості регіонів України.

Біоенергетика – цей напрям охоплює використання біомаси, біогазу та рідкого біопалива. Є два способи вироблення цієї енергії: пряме спалення біомаси або її переробка на біогаз. Україна багата на сировину для біоенергетики, зокрема на відходи сільськогосподарського виробництва [4]. Незважаючи на значний потенціал в аграрних регіонах, для окремої офісно-виробничої будівлі цей варіант є складним в реалізації через потребу в постійному постачанні сировини та наявності спеціалізованого обладнання для її переробки.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика альтернативних джерел енергії

Джерело енергії	Переваги	Недоліки
Сонячна енергія	Доступність, екологічність, низькі експлуатаційні витрати, можливість інтеграції в будівлі	Висока початкова вартість, залежність від сонячної активності
Вітрова енергія	Відновлюваність, робота вночі	Нестабільність, шум, потреба в просторах, непридатність для міської забудови
Гідроенергія	Надійність, висока ефективність	Екологічні ризики, географічні обмеження
Біоенергетика	Використання відходів, відносна автономність	Потреба в логістиці сировини, викиди при спалюванні

Геотермальна енергія	Стабільне джерело, мінімальні експлуатаційні витрати	Висока вартість буріння, обмежене застосування
----------------------	--	---

Аналіз показав, що найбільш оптимальним джерелом альтернативної енергії для застосування в умовах офісно-виробничої будівлі є сонячна енергія. Її потенціал в Україні високий, а технічна реалізація для інтеграції в існуючу інфраструктуру є найбільш простою та надійною. Фотоелектричні системи дозволяють забезпечити незалежність від централізованих мереж та значно зменшити витрати на електроенергію.

1.2. Класифікація та аналіз основного обладнання сонячних електростанцій

Система електропостачання на основі сонячної енергії є складним технічним комплексом, який включає наступні ключові елементи: сонячні панелі (фотоелектричні модулі), інвертор, акумуляторні батареї (АКБ), контролери заряду, монтажні конструкції, кабельну мережу та системи моніторингу й управління. Разом ці компоненти забезпечують генерацію електроенергії із сонячного випромінювання, її перетворення, накопичення та подачу до споживачів або в централізовану електромережу.

Сонячні панелі (фотоелектричні модулі) – це основний елемент системи, що здійснює перетворення сонячної енергії в постійний електричний струм. Найчастіше використовують два типи панелей:

- Монокристалічні — мають високий коефіцієнт корисної дії (до 22%) і довговічність (понад 25 років), однак дорожчі.

- Полікристалічні — дешевші, ефективність трохи нижча (до 18%), але також широко застосовуються.

При виборі панелей для офісно-виробничої будівлі слід звертати увагу на такі характеристики:

- Температурний коефіцієнт — показує, як падає продуктивність при нагріванні, що є важливим для дахових установок.

- Гарантія виробника — зазвичай 10–15 років на сам модуль і до 25 років на збереження ефективності.

- Клас захисту (IP) — важливий при встановленні в умовах промислових зон з підвищеною запиленістю.

Сонячні панелі встановлюються на дахах, фасадах або наземних конструкціях, з урахуванням оптимального кута нахилу (в Україні — 30–45°) для максимального збору енергії [5, с. 28-35]. *Приклад: Панелі Jinko Solar Tiger Pro 545 Вт мають ККД 21,3%, температурний коефіцієнт $-0,35\%/^{\circ}\text{C}$ і чудово підходять для комерційного застосування.*

Інвертори — це пристрої, що перетворюють постійний струм (DC), вироблений панелями, у змінний струм (AC), придатний для використання у промисловій мережі.

За функціональністю інвертори поділяються на:

- Мережеві — передають енергію безпосередньо в загальну мережу.
- Автономні — працюють незалежно від зовнішньої мережі.
- Гібридні — універсальні системи, що дозволяють як автономну роботу, так і роботу з мережею.

Інвертор є «керівним блоком» всієї системи. Мережеві інвертори не можуть працювати під час відключення електроенергії, тому не підходять для об'єктів з критичним навантаженням (серверні, системи безпеки). У такому випадку гібридний інвертор із функцією автоматичного перемикання між мережею, СЕС і акумуляторами забезпечує безперервність живлення.

Порівняльна характеристика інверторів

Тип інвертора	Необхідність акумуляторів	Можливість роботи з мережею	Застосування	ККД
Мережевий	Ні	Так	Продаж енергії, робота паралельно з мережею	95–98%
Автономний	Так	Ні	Віддалені об'єкти без мережі	90–95%
Гібридний	Так	Так	Універсальне використання, резервне живлення	92–97%

Приклад: Модель Victron MultiPlus-II 5kVA підтримує одночасну роботу з мережею, АКБ і СЕС, дозволяє контролювати споживання через додаток VictronConnect.

Акумуляторні батареї (АКБ) — дозволяють зберігати енергію для використання у вечірній та нічний час, а також у разі перебоїв у постачанні. Існують два основні типи АКБ:

Свинцево-кислотні (AGM, GEL). Традиційні акумулятори з невисокою вартістю, але малою кількістю циклів (400–1200) та чутливістю до глибокого розряду.

Літій-іонні (LiFePO₄). Сучасні високоефективні рішення з великою кількістю циклів (понад 4000), глибиною розряду до 100% та швидким зарядом.

Таблиця 1.3

Порівняльна таблиця свинцево-кислотних та літій-іонних АКБ

Характеристика	Свинцево-кислотні	Літій-іонні (LiFePO ₄)
Кількість циклів	400–1200	4000–6000
Глибина розряду	50–70%	90–100%
Ефективність (ККД)	80–85%	95–98%
Вага	Висока	Низька
Ціна за кВт·год	Низька	Вища

Фактори, які впливають на вибір акумуляторів:

- Режим використання: чи потрібне повне автономне живлення, чи лише резервне?
- Кліматичні умови: температурна стабільність особливо критична для LiFePO₄.
- Бюджет: свинцеві дешевші, але частіше потребують заміни.
- Можливість масштабування: літій-іонні легко комбінуються в модульні рішення.
- Обмежений простір: літійові системи займають менше місця при більшій ємності.

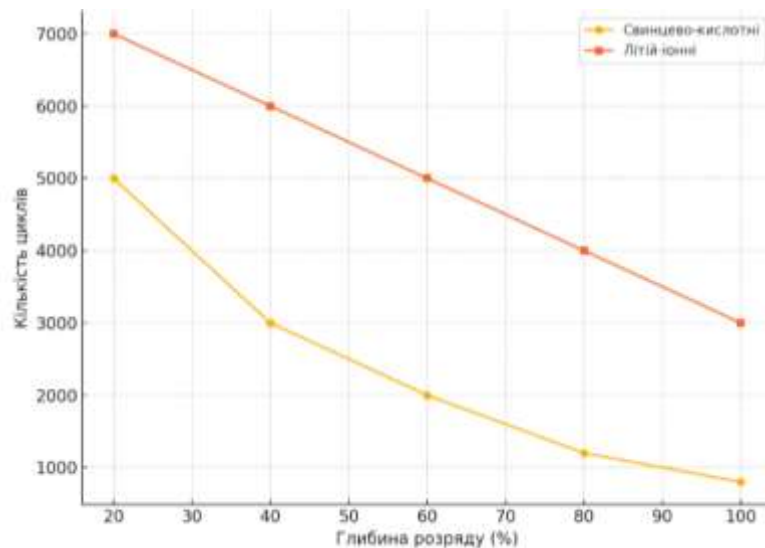


Рис.1.2.Термін служби акумуляторів залежно від глибини розряду

Сучасна тенденція в сонячній енергетиці — це перехід до літій-іонних систем з розумним управлінням (BMS). Такі рішення не лише надійніші та довговічніші, а й краще підходять для інтелектуальних мереж. Для офісно-виробничої будівлі, де важлива стабільність роботи обладнання, доцільно застосовувати модульні літій-іонні АКБ [9].

Контролери заряду – керують процесом зарядки акумуляторів, запобігаючи перенапрузі та глибокому розряду.

PWM-контролери — простіші та дешевші.

MPPT-контролери — оптимізують заряд, дозволяючи зібрати більше енергії (до 30%) в умовах мінливої хмарності, що є критичним для максимізації генерації.

Монтажні конструкції – служать для закріплення панелей. Виділяють:

Стаціонарні (фіксовані). Найбільш поширений варіант для дахових СЕС.

Трекерні системи. Автоматично змінюють орієнтацію панелей за Сонцем, збільшуючи генерацію на 25–35%, але є значно дорожчими та складнішими в обслуговуванні.

Кабельна мережа та системи захисту - потрібні для передавання енергії між компонентами. Важливі критерії: правильний переріз кабелю для мінімізації втрат, використання спеціалізованого солярного кабелю (стійкого до УФ-випромінювання та перепадів температур), а також наявність захисної автоматики (запобіжники, автоматичні вимикачі, ПЗП).

Системи моніторингу та управління – дозволяють стежити за роботою станції в режимі реального часу. Інтелектуальні системи дозволяють:

- Виявляти деградацію окремих панелей.
- Автоматично сповіщати про збої.
- Будувати графіки генерації та споживання.
- Зчитувати статистику віддалено через Wi-Fi або GSM-модуль.

У промислових умовах офісно-виробничих будівель доцільно впроваджувати SCADA-системи для дистанційного управління та повної диспетчеризації. *Приклад: Система Huawei Smart Logger підтримує одночасне підключення до 80 інверторів і відображає аналітику в хмарному кабінеті.*

1.3. Огляд типових схемних рішень інтеграції СЕС у системи електропостачання будівель

Інтеграція сонячних електростанцій в існуючі системи електропостачання є ключовим етапом, що визначає функціональність, надійність та економічну ефективність всієї системи. Сучасна енергетика відходить від суто централізованої моделі до гнучких, децентралізованих рішень, де споживач стає активним учасником ринку — виробником (prosumer). У цьому контексті вибір схемного рішення для підключення СЕС до будівлі залежить від стратегічних цілей: максимальна економія, повна енергетична незалежність або поєднання обох переваг. Існують три фундаментальні підходи до інтеграції: мережевий (On-Grid), автономний (Off-Grid) та гібридний (Hybrid).

Найбільш поширеним у світі та в Україні є мережеве (On-Grid) схемне рішення.

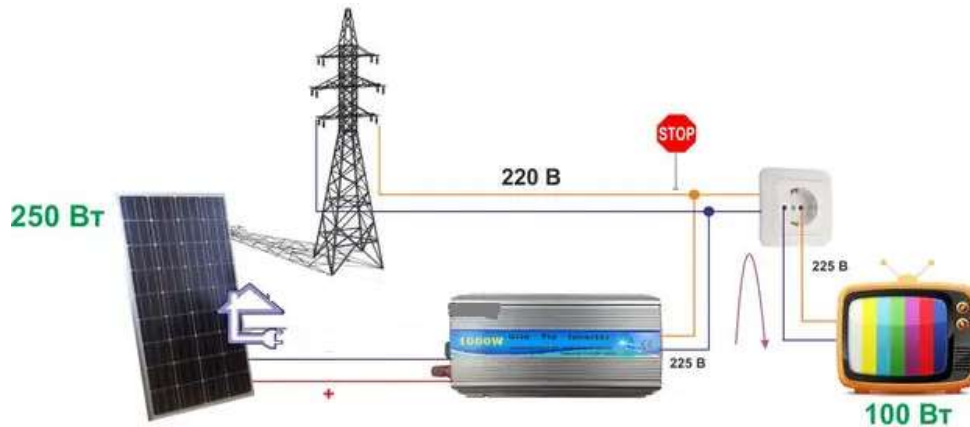


Рис.1.3. Мережеве (On-Grid) схемне рішення

Його головна мета — економічна ефективність та зниження споживання з централізованої мережі. Принцип роботи такої системи полягає у паралельній роботі СЕС із зовнішньою електромережею. Сонячні модулі генерують постійний струм, який мережевий інвертор перетворює на змінний, повністю синхронізуючи його за частотою та напругою з параметрами мережі. Вироблена енергія першочергово спрямовується на покриття поточних потреб об'єкта. Якщо в сонячний день генерація перевищує споживання, надлишок автоматично експортується в загальну мережу, що дозволяє власнику отримувати дохід за механізмами «зеленого тарифу» або Net-Billing. У випадку, коли споживання перевищує генерацію, наприклад, у вечірні години або в похмуру погоду, нестача енергії безшовно добирається з мережі. Ключовою перевагою такої схеми є її відносно низька початкова вартість, оскільки вона не потребує значних інвестицій у дорогі акумуляторні батареї, а також висока ефективність перетворення енергії. Однак, її фундаментальним недоліком є повна залежність від стабільності централізованої мережі. З міркувань безпеки, при зникненні напруги в зовнішній мережі інвертор миттєво припиняє генерацію, щоб унеможливити подачу струму на лінію, де можуть проводитися ремонтні роботи.

Таким чином, для офісно-виробничої будівлі мережева СЕС є чудовим інструментом для зменшення операційних витрат, але не вирішує завдання забезпечення енергетичної безпеки та безперебійності роботи.

Повною протилежністю є автономне (Off-Grid) схемне рішення, розроблене для об'єктів, що не мають фізичного підключення до централізованої мережі або прагнуть до абсолютної енергетичної незалежності. У такій конфігурації сонячна електростанція є єдиним джерелом живлення. Вся вироблена панелями енергія через контролер заряду накопичується в акумуляторних батареях.

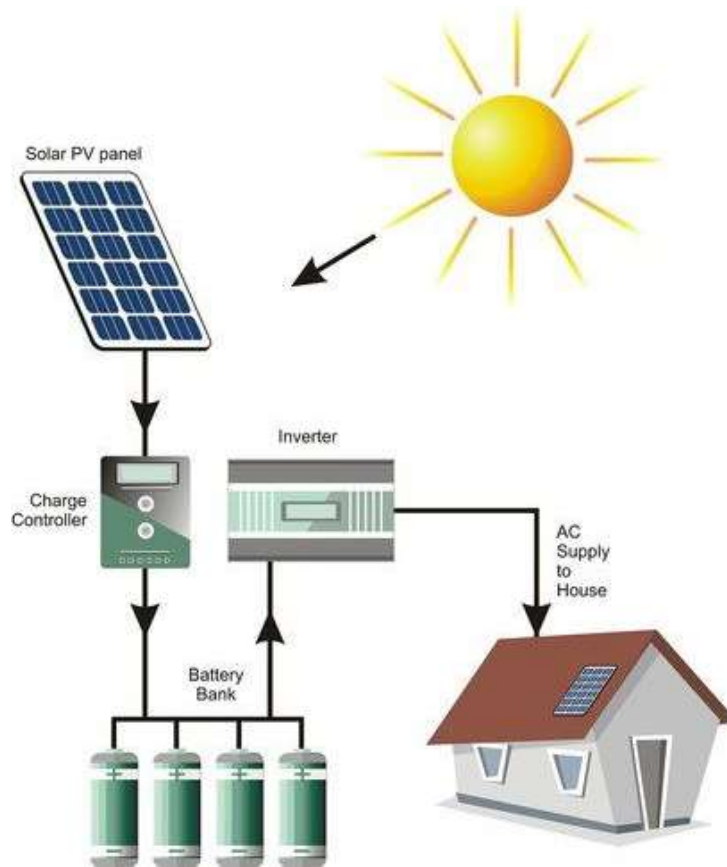


Рис.1.4. Автономне (Off-Grid) схемне рішення

Автономний інвертор перетворює постійний струм від АКБ на стабільний змінний струм для живлення всіх споживачів. Така система вимагає ретельного планування та точного розрахунку «енергетичного бюджету» об'єкта, оскільки

вся доступна енергія обмежується добовою генерацією та ємністю накопичувачів. Головна перевага цієї схеми — повна незалежність від зовнішніх факторів, що дозволяє електрифікувати віддалені об'єкти. Водночас недоліки є суттєвими: дуже висока вартість через необхідність встановлення масиву акумуляторів великої ємності, нижчий загальний ККД через втрати на заряд/розряд АКБ та потреба в періодичній заміні батарей. Для сучасної офісно-виробничої будівлі, що зазвичай знаходиться в межах доступу до мережі, така схема є нерациональною як основне джерело живлення.

Найбільш технологічно досконалим та функціональним є гібридне (Hybrid) схемне рішення, яке об'єднує переваги мережевих та автономних систем. Гібридна СЕС одночасно підключена до загальної мережі та оснащена акумуляторними батареями.

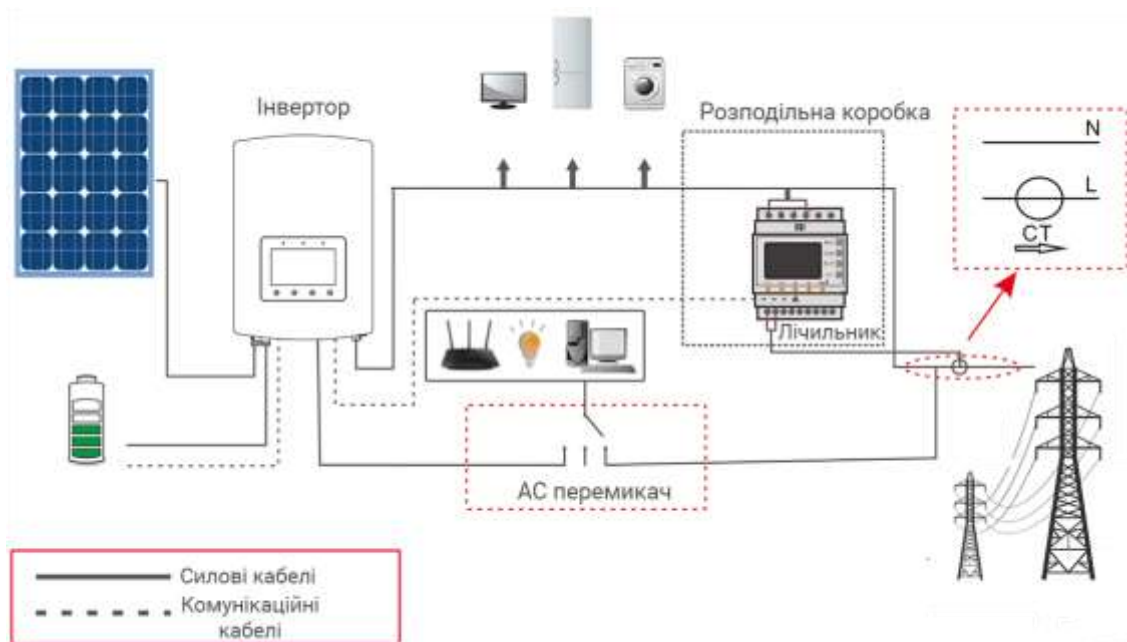


Рис. 1.5. Гібридне (Hybrid) схемне рішення

Серцем системи є гібридний інвертор, який діє як інтелектуальний менеджер енергетичних потоків. Він дозволяє гнучко налаштовувати пріоритети: максимальне використання сонячної енергії для власних потреб, накопичення

надлишків в АКБ для використання ввечері, продаж надлишків у мережу і, що найважливіше, миттєве перемикання в автономний режим у разі зникнення напруги в централізованій мережі. Це забезпечує безперебійне живлення для критично важливих навантажень, таких як серверне обладнання, системи безпеки та відеоспостереження, освітлення, вузли зв'язку та специфічне виробниче обладнання, для якого простій є неприпустимим. Хоча гібридна система є найдорожчою на етапі інвестування через вартість інвертора та акумуляторів, вона пропонує максимальний рівень енергетичної безпеки та гнучкості. Для офісно-виробничої будівлі, де стабільність бізнес-процесів є ключовим пріоритетом, саме гібридна схема є найбільш обґрунтованим та стратегічно правильним вибором.

Підсумовуючи, можна констатувати, що вибір схемного рішення для інтеграції СЕС безпосередньо залежить від поставлених завдань. Мережева система є суто економічним інструментом, автономна — засобом для досягнення повної незалежності, тоді як гібридна система виступає комплексним рішенням, що забезпечує як економію, так і високий рівень надійності та енергетичної стійкості. В умовах сучасних викликів для бізнесу саме здатність гібридної СЕС гарантувати безперебійне живлення робить її найбільш перспективною для впровадження на комерційних об'єктах.

1.4. Постановка мети та завдань дослідження

Проведений у попередніх підрозділах аналіз стану сонячної енергетики, наявного обладнання та типових схемних рішень дозволяє сформулювати мету та конкретні завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи.

Метою роботи є підвищення енергоефективності та надійності системи електропостачання офісно-виробничої будівлі шляхом розробки та техніко-економічного обґрунтування проєкту інтеграції гібридної сонячної електростанції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- Проаналізувати особливості електроспоживання офісно-виробничої будівлі, визначити характер та величину розрахункових навантажень, а також вимоги до надійності живлення критично важливого обладнання.
- На основі аналізу навантажень розробити структурну схему гібридної сонячної електростанції та виконати обґрунтований вибір основного обладнання: фотоелектричних модулів, гібридного інвертора та акумуляторних батарей.
- Виконати розрахунок основних параметрів роботи сонячної електростанції, включаючи прогнозований обсяг річної генерації електроенергії та необхідну ємність акумуляторних батарей для забезпечення резервного живлення.
- Провести техніко-економічне обґрунтування розробленого проєктного рішення, розрахувавши капітальні витрати та визначивши ключові показники ефективності, зокрема орієнтовний термін окупності інвестицій.

Висновки по розділу 1

У першому розділі було проведено комплексний аналітичний огляд існуючих систем електропостачання з використанням сонячних електростанцій, за результатами якого можна зробити наступні висновки:

Аналіз стану та перспектив використання сонячної енергетики показав її високу актуальність для комерційних об'єктів України. В умовах постійного зростання тарифів на електроенергію та ризиків нестабільного енергопостачання, впровадження СЕС дозволяє підприємствам не лише суттєво знизити операційні витрати, а й підвищити свою енергетичну безпеку та стійкість до зовнішніх викликів.

Розглянуто класифікацію та основні характеристики сучасного обладнання для побудови сонячних електростанцій. Встановлено, що технологічний

розвиток галузі пропонує високоефективні рішення, зокрема монокристалічні фотоелектричні модулі з ККД понад 21% та довговічні літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумуляторні батареї. Саме ці компоненти є оптимальними для побудови надійних та продуктивних СЕС для комерційних об'єктів.

Проаналізовано три типові схемні рішення інтеграції СЕС: мережеве, автономне та гібридне. Було обґрунтовано, що для офісно-виробничої будівлі, де однаково важливими є як економічна ефективність, так і гарантія безперебійності бізнес-процесів, найбільш доцільною та функціональною є гібридна схема. Вона поєднує можливість економії коштів за рахунок власної генерації та забезпечення резервного живлення для критично важливих навантажень під час відключень централізованої мережі.

На основі проведеного аналізу були чітко сформульовані мета та основні завдання дослідження. Ключовою метою роботи визначено розробку та техніко-економічне обґрунтування проєкту гібридної СЕС для конкретної офісно-виробничої будівлі. Це заклало міцну теоретичну основу для виконання практичних розрахунків та розробки проєктних рішень у наступних розділах кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОФІСНО-ВИРОБНИЧОЇ БУДІВЛІ ЯК ОБ'ЄКТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1. Аналіз місця розташування об'єкта та кліматичних даних

Об'єктом дослідження є сучасна офісно-виробнича будівля, розташована в Київській області. Будівля знаходиться у приміській промислово-діловій зоні, що характеризується наявністю доступу до централізованих комунікацій, зокрема до трифазної електромережі, та зручною транспортною розв'язкою. Таке розташування є типовим для сучасних комерційних об'єктів, що поєднують адміністративні та виробничі функції.

Кліматичні умови регіону є ключовим фактором, що визначає потенціал генерації сонячної електростанції. Київська область знаходиться в зоні помірно-континентального клімату з чітко вираженими сезонами. Для аналізу були використані усереднені багаторічні дані по сонячній інсоляції та температурі для даного регіону, що відповідають вимогам нормативних документів з будівельної кліматології.

Сонячна інсоляція — це кількість сонячної енергії, що надходить на одиницю площі горизонтальної поверхні. Цей показник безпосередньо впливає на продуктивність фотоелектричних модулів. Дані по інсоляції та середньомісячній температурі для Київської області наведені в таблиці 2.1 [15].

Таблиця 2.1

Кліматичні дані для Київської області

Місяць	Середня температура, °C	Сумарна сонячна інсоляція, кВт·год/м ²
Січень	-5,6	29
Лютий	-4,2	51

Продовження Таблиці 2.1

Березень	0,7	95
Квітень	8,7	138
Травень	15,1	185
Червень	18,2	198
Липень	19,3	205
Серпень	18,6	176
Вересень	13,5	118
Жовтень	7,6	65
Листопад	1,8	31
Грудень	-2,9	22
Річна	7,7 (середня)	1313 (сумарна)

Як видно з таблиці 2.1., регіон має виражену сезонність сонячної активності: пік генерації припадає на літні місяці (травень-серпень), тоді як у зимовий період (листопад-лютий) продуктивність СЕС буде значно нижчою. Цей фактор є вирішальним при проєктуванні гібридної системи та розрахунку необхідної ємності акумуляторних батарей для забезпечення автономної роботи. Температурні показники також важливі, оскільки ефективність сонячних панелей знижується при їх перегріві у літній період.

Досліджуваний об'єкт — це триповерхова будівля загальною площею близько 2500 м², яка функціонально поділена на дві основні зони: офісну та виробничо-складську. Будівля має плоский дах площею близько 800 м², що є ідеальним місцем для розміщення сонячних панелей [16].

Офісна зона, що займає близько 1000 м², є адміністративним центром будівлі. Тут розміщуються кабінети керівництва, відділи розробки, бухгалтерія, переговорні кімнати та зони відпочинку. Основними споживачами електроенергії в цій зоні є численна комп'ютерна та офісна техніка, зокрема робочі станції,

сервери та принтери. Значну частку споживання також складають системи світлодіодного освітлення та кліматичне обладнання, таке як системи вентиляції та кондиціонування (HVAC), що забезпечують комфортні умови для персоналу.



Рис.2.1. Виробничо-складська зона площею близько 1500 м²

Виробничо-складська зона площею близько 1500 м² призначена для легкої промислової діяльності, наприклад, збірки електроніки чи фасування товарів, а також для зберігання сировини та готової продукції. Енергоспоживання тут визначається роботою виробничого обладнання, до якого можна віднести невеликі верстати, складальні лінії та пакувальні машини. Крім того, значними споживачами є потужна система промислової вентиляції, спеціалізоване освітлення та зарядні станції для електричної складської техніки.

Всю будівлю обслуговують централізовані інженерні системи, які є основними споживачами електроенергії. Найбільш енергоємною є система опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC), що включає чиллери, теплові насоси та вентиляційні установки, її споживання має виражений сезонний характер. Критично важливим є навантаження від IT-інфраструктури, що включає центральну серверну кімнату, яка потребує безперебійного живлення 24/7. До таких же критичних навантажень відносяться системи безпеки, зокрема відеоспостереження, охоронна та пожежна сигналізація. Інші значні споживачі включають насосні станції систем водопостачання та ліфтове обладнання [17].

Таким чином, офісно-виробнича будівля є комплексним об'єктом з різномірним типом навантажень: постійним (сервери, системи безпеки), змінним денним (офісна техніка, виробництво) та сезонним (опалення, кондиціонування).

2.2. Розрахунок електричних навантажень та побудова графіків споживання електроенергії

Розрахунок електричних навантажень є фундаментальним етапом проєктування системи електропостачання, оскільки він визначає необхідну потужність джерел живлення, номінали захисної апаратури та перерізи кабельних ліній. Метою даного розрахунку є визначення сумарної встановленої та розрахункової потужності всіх електроприймачів офісно-виробничої будівлі.

Розрахунок виконується методом коефіцієнта попиту, який враховує, що не всі електроприймачі працюють одночасно та на повну потужність. Розрахункове навантаження (P_p) для групи споживачів визначається за формулою:

$$P_p = P_{вст} \cdot K_p \quad (2.1)$$

де $P_{вст}$ — сумарна встановлена (номінальна) потужність електроприймачів групи, кВт;

K_{Π} — коефіцієнт попиту для даної групи споживачів [18].

Для виконання розрахунку всі електроприймачі будівлі були згруповані за їх функціональним призначенням та режимом роботи. Перелік обладнання та результати розрахунку зведені в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2

Розрахунок електричних навантажень офісно-виробничої будівлі

Найменування групи споживачів	К-ть, шт.	$P_{\text{ном}}$, кВт	$P_{\text{вст}}$, кВт	K_{Π}	P_p , кВт	Примітки
Освітлення			13,5	0,9	12,15	Внутрішнє та зовнішнє
Світильники офісні LED	250	0,04	10,0			
Світильники виробничі LED	20	0,1	2,0			
Прожектори зовнішні LED	15	0,1	1,5			
Офісне обладнання			32,0	0,6	19,2	Робочі місця
Робочі станції (ПК, монітори)	100	0,3	30,0			
Багатофункціональні пристрої	15	0,5	7,5			
ІТ-інфраструктура (серверна)			5,0	1,0	50	Критичне навантаження, 24/7
Сервери, комутатори, СЗД	1	5,0	5,0			

Продовження Таблиці 2.2

Система HVAC			125,0	0,7	87,5	Сезонне навантаження
Чиллер / Тепловий насос	1	100,0	100,0			
Вентиляційні установки	2	12,5	25,0			
Виробниче обладнання			25,0	0,5	12,5	Однозмінний режим роботи
Складальна лінія	1	15,0	15,0			
Допоміжне обладнання	5	2,0	10,0			
Інші навантаження			15,0	0,4	6,0	
Насосна станція	2	5,0	10,0			
Ліфт вантажопасажирський	1	10,0	10,0			
РАЗОМ			245,5	-	142,35	

Згідно з розрахунком, сумарна встановлена потужність електроприймачів будівлі складає 245,5 кВт. Розрахункове (пікове) навантаження, яке повинна витримувати система електропостачання, становить 142,35 кВт. Це значення буде використовуватись для вибору потужності інверторного обладнання та номіналів захисної апаратури.

Електроспоживання будівлі не є постійним і значно змінюється протягом доби та в залежності від сезону. Для аналізу та подальшого проектування СЕС важливо побудувати типові добові графіки навантаження для літнього та зимового робочих днів.

Літній період. Характеризується максимальним навантаженням у денний час (з 7:00 до 20:00) через активну роботу офісного та виробничого обладнання, а також інтенсивну роботу системи кондиціонування (HVAC). Вночі споживання мінімальне і визначається лише роботою серверної та чергових систем (близько 5-7 кВт).

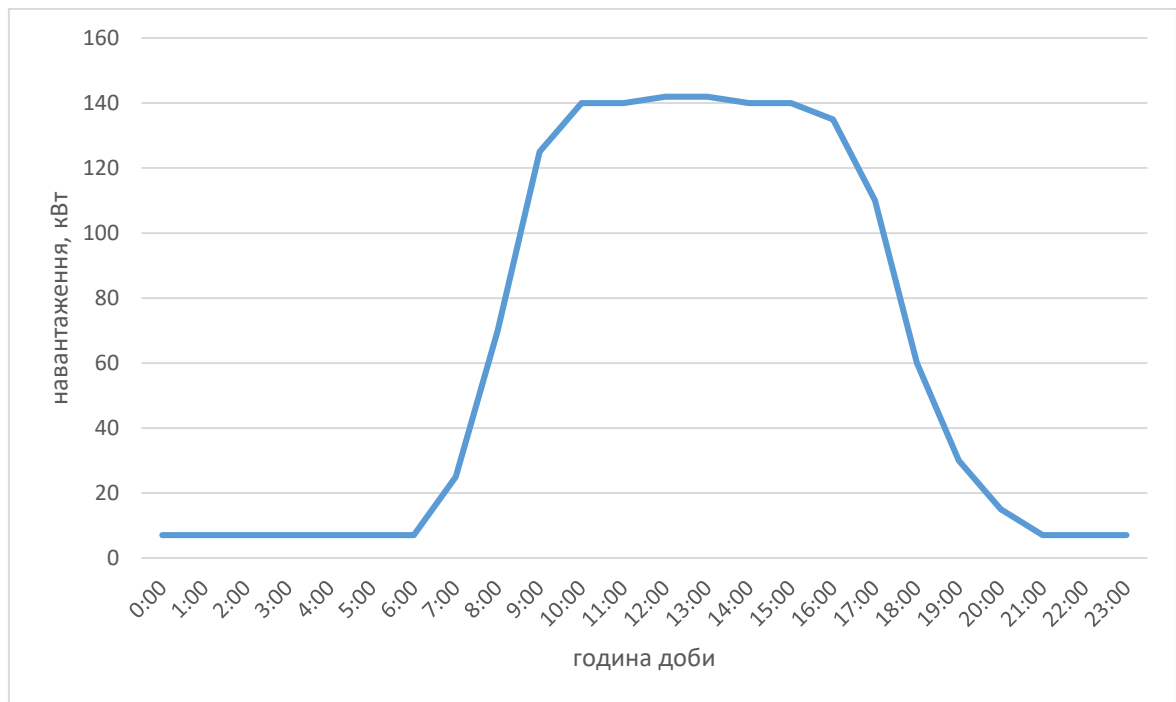


Рис.2.2.Добовий графік навантаження в літній період

Зимовий період. Денне навантаження залишається високим через роботу персоналу та обладнання. Система HVAC працює в режимі опалення. Значно зростає роль штучного освітлення у ранкові та вечірні години.

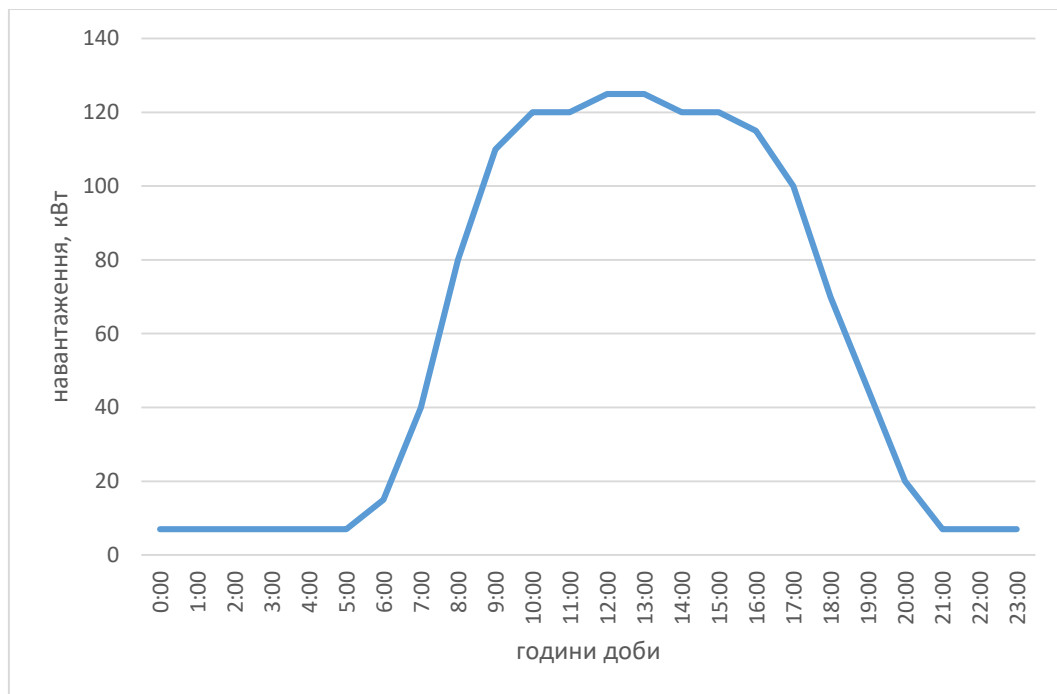


Рис.2.3.Добовий графік навантаження в зимовий період

Аналіз графіків показує, що пікове споживання електроенергії припадає на денні години, що ідеально збігається з періодом максимальної сонячної активності. Це створює сприятливі умови для прямого використання сонячної генерації для покриття значної частини денного навантаження, що є ключовим фактором для економічної ефективності проєкту. Сумарне добове споживання електроенергії оцінюється в середньому в 950 кВт·год для літнього періоду та 850 кВт·год для зимового. Ці дані стануть основою для розрахунку потенціалу генерації СЕС та необхідної ємності акумуляторних батарей.

2.3. Визначення потенціалу сонячної генерації на основі даних по інсоляції

Визначення потенціалу сонячної генерації є критично важливим етапом при проєктуванні СЕС, оскільки дозволяє оцінити обсяги виробництва електроенергії та спланувати її інтеграцію у загальну систему електропостачання будівлі. Цей розрахунок базується на кліматичних даних по сонячній інсоляції,

характеристиках обраних фотоелектричних модулів та параметрах розміщення СЕС.



Рис. 2.4. Оптимальний кут нахилу сонячних панелей

Для розрахунку потенціалу генерації СЕС необхідно врахувати наступні ключові параметри:

- Сумарна сонячна інсоляція для Київської області (з таблиці 2.1).
- Площа даху, доступна для встановлення сонячних панелей.
- ККД фотоелектричних модулів.
- Коефіцієнт втрат системи, що враховує деградацію модулів, температурні впливи, втрати в кабелях, інверторі та інші фактори.

Приймаючи, що для розміщення сонячних панелей доступна значна частина плаского даху площею 800 м², необхідно врахувати оптимальний кут нахилу та відстань між рядами для уникнення затінення. Для Київської області оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів до горизонту становить приблизно 30-35° [5, с. 38]. З урахуванням необхідних проходів для обслуговування, вентиляції та затінення, орієнтовна ефективна площа для встановлення панелей складатиме близько 60% від загальної площі даху, тобто

$$800\text{м}^2 \cdot 0,6 = 480\text{м}^2$$

Для розрахунку приймемо наступні характеристики обладнання:

- Тип модулів: Монокристалічні з ККД = 21,5%.
- Коефіцієнт втрат системи (Квтрат): Приймаємо 0,8 (або 20% втрат), що є типовим значенням для добре спроектованих СЕС і враховує всі системні втрати [19].

Розрахунок теоретичного потенціалу генерації

Середньомісячна генерація електроенергії (E_M , кВт·год) може бути розрахована за формулою:

$$E_M = I_M \cdot S_{\text{еф}} \cdot \text{ККД}_{\text{мод}} \cdot K_{\text{втрат}} \quad (2.2)$$

де I_M — сумарна сонячна інсоляція за місяць, кВт·год/м² (з таблиці 2.1);

$S_{\text{еф}}$ — ефективна площа сонячних панелей, м²;

$\text{ККД}_{\text{мод}}$ — коефіцієнт корисної дії фотоелектричних модулів;

$K_{\text{втрат}}$ — коефіцієнт системних втрат.

Проведемо розрахунок місячної та річної генерації електроенергії, результати зведемо в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3

Розрахунок потенціалу генерації СЕС

Місяць	I_M , кВт·год/м ²	E_M , кВт·год
Січень	29	$29 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 2394,24$
Лютий	51	$51 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 4208,64$
Березень	95	$95 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 7843,20$
Квітень	138	$138 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 11394,24$
Травень	185	$185 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 15278,40$
Червень	198	$198 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 16358,40$
Липень	205	$205 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 16934,40$
Серпень	176	$176 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 14530,56$

Продовження Таблиці 2.3

Вересень	118	$118 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 9749,76$
Жовтень	65	$65 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 5366,40$
Листопад	31	$31 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 2561,28$
Грудень	22	$22 \cdot 480 \cdot 0,215 \cdot 0,8 = 1817,28$
Річна	1313	108416,80

Таким чином, річний потенціал генерації електроенергії сонячною електростанцією з ефективною площею 480 м² становить приблизно 108416,8 кВт·год. Це значний обсяг, який може покрити суттєву частину річного електроспоживання офісно-виробничої будівлі, що за попередніми оцінками становить близько 950 кВт·год/добу * 365 днів = 346750 кВт·год/рік (або 850 кВт·год/добу * 365 днів = 310250 кВт·год/рік, в залежності від сезону).

Для визначення встановленої потужності СЕС необхідно розділити загальну річну генерацію на середнє число сонячних годин в регіоні (або використовувати питоме значення генерації на 1 кВт встановленої потужності). Простішим підходом є розрахунок кількості модулів.

Якщо прийняти, що середньостатистичний сонячний модуль має потужність 550 Вт (0,55 кВт) і площу 2,2 м² (для ККД 21,5%), то на ефективній площі 480 м² можна розмістити близько

$$\frac{480}{2,2} \approx 218 \text{ модулів}$$

Тоді встановлена потужність СЕС становитиме

$$218 \cdot 0,55 \approx 119,9 \text{ кВт}$$

Отже, для подальших розрахунків будемо використовувати встановлену потужність СЕС 120 кВт.

Графік місячної генерації електроенергії, що ілюструє сезонні коливання, наведено на рисунку 2.5.

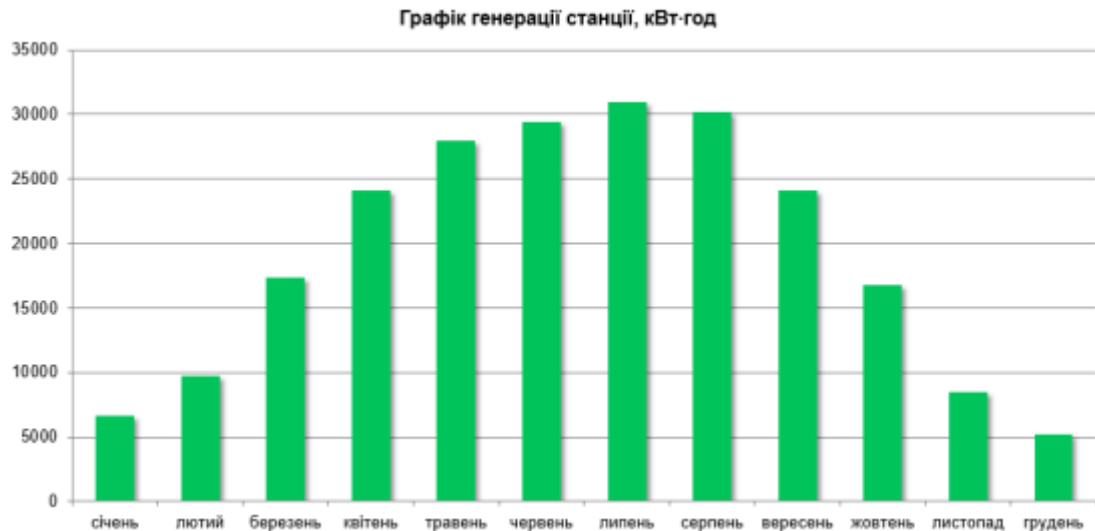


Рис. 2.5. Місячна генерація електроенергії СЕС

Зіставлення потенціалу генерації з графіками споживання (рисунок 2.2, 2.3) показує, що пік сонячної генерації (літо) збігається з піком споживання (кондиціонування), що сприятиме максимальному власному споживанню виробленої електроенергії. Однак, у зимові місяці генерація буде значно нижчою, що підтверджує необхідність використання гібридної системи з акумуляторними батареями для забезпечення стабільності електропостачання та компенсації нестачі сонячної енергії.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено детальний аналіз офісно-виробничої будівлі як об'єкта електропостачання, в ході якого визначено розрахункові електричні навантаження та побудовано типові добові графіки споживання. Встановлено, що пік споживання електроенергії припадає на денні години, що є сприятливою умовою для прямого використання сонячної енергії. Аналіз структури навантажень дозволив виділити групу критичних споживачів, що потребують безперебійного живлення, що обґрунтовує необхідність впровадження системи з функцією резервування. На основі кліматичних даних

по інсоляції для Київської області було розраховано потенційний річний обсяг генерації СЕС, що дозволило оцінити її можливий внесок у загальний енергобаланс будівлі. Отримані в цьому розділі дані є вихідними для подальшого вибору обладнання та розробки проєктних рішень у третьому розділі.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ІНТЕГРОВАНОЮ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

3.1. Обґрунтування вибору типу СЕС (мережева, гібридна)

Вибір оптимального типу сонячної електростанції (СЕС) є ключовим етапом проектування, що визначає її функціональність, економічну доцільність та надійність [19, с. 15]. Для офісно-виробничої будівлі, яка має підключення до централізованої електромережі, але водночас потребує забезпечення безперебійного живлення критичних навантажень, необхідно ретельно проаналізувати можливості різних конфігурацій СЕС, а саме: мережевої (On-Grid), автономної (Off-Grid) та гібридної.

Мережева (On-Grid) СЕС працює виключно паралельно з централізованою електромережею. Вироблена сонячними панелями електроенергія споживається об'єктом, а надлишки автоматично віддаються в зовнішню мережу, за наявності «зеленого» тарифу або механізму чистого обліку (Net Metering). У періоди недостатньої генерації, наприклад, вночі або за хмарної погоди, електроенергія береться з мережі [19, с. 22].

Основними перевагами такої системи є її висока економічна ефективність, оскільки оптимізація власного споживання та потенційний продаж надлишків забезпечують швидку окупність інвестицій. Крім того, відсутність акумуляторних батарей значно знижує початкові інвестиції, спрощує експлуатацію, обслуговування та усуває питання їх утилізації. Простота конструкції також є вагомим плюсом порівняно з іншими типами систем [15, с. 67].

Однак, мережева СЕС має суттєвий недолік, який полягає у її повній залежності від зовнішньої мережі. У разі відключення централізованої електромережі (блекаут) мережевий інвертор автоматично вимикається з

міркувань безпеки, щоб не подавати напругу на знеструмлену мережу, де можуть працювати ремонтні бригади. Це означає, що будівля залишається без електроенергії, навіть якщо сонце світить і панелі генерують.

Отже, такий тип СЕС не може забезпечити резервування критичних навантажень [15, с. 70]. З огляду на ці обставини, мережева СЕС не підходить для даного об'єкта, оскільки не задовольняє вимоги до надійності електропостачання критичних систем.

Автономна (Off-Grid) СЕС є повністю незалежною системою, яка не підключається до централізованої мережі. Вся вироблена сонячна енергія або споживається, або накопичується в акумуляторних батареях для подальшого використання, що робить її єдиним джерелом електропостачання [15, с. 72].

Головними перевагами є повна енергетична незалежність та захист об'єкта від відключень зовнішньої мережі. Також існує гнучкість розміщення, оскільки об'єкт може знаходитися далеко від централізованих електромереж, хоча для нашого випадку це неактуально [6, с. 45].

Проте, автономна СЕС характеризується високою вартістю через значні капітальні витрати на потужні акумуляторні батареї та контролери заряду. Її експлуатація є більш складною, оскільки акумуляторні батареї потребують регулярного обслуговування та мають обмежений термін служби. До того ж, система має нижчий ККД через значні втрати енергії під час циклів заряд-розряд АКБ [19, с. 30]. Також необхідна надмірність потужності та значний запас ємності АКБ і генерації для покриття найдовших періодів без сонця, що економічно невигідно для об'єкта з доступом до мережі. Тому автономна СЕС є надмірною та економічно невиправданою для офісно-виробничої будівлі, що має надійне підключення до централізованої мережі.

Гібридна СЕС поєднує в собі найкращі аспекти мережевих та автономних систем. Вона підключена до централізованої мережі, але також має акумуляторні батареї [6, с. 50]. Інвертор керує потоками енергії: сонячна енергія споживається

об'єктом, надлишки заряджають АКБ або віддаються в мережу. При відключенні зовнішньої мережі інвертор переходить в автономний режим, живлячи визначені критичні навантаження від сонячних панелей та АКБ [19, с. 45]. Ця конфігурація забезпечує оптимальне поєднання економічної ефективності та надійності, дозволяючи економити на електроенергії в денний час, продавати надлишки в мережу та забезпечувати безперебійне живлення критичних навантажень під час блекаутів.

Гібридна система пропонує гнучкість управління енергією, що дає можливість програмування інвертора для пріоритетного споживання сонячної енергії, зарядки АКБ, продажу в мережу або споживання з мережі за певним графіком (наприклад, зарядка АКБ вночі за дешевим тарифом). Вона також масштабована, що дозволяє додавати акумуляторні батареї у майбутньому або розширювати сонячне поле. Важливою перевагою є енергетична незалежність критичних навантажень, що забезпечує безперебійну роботу ключового обладнання та систем будівлі. До того ж, використання гібридної системи сприяє зменшенню пікових навантажень за рахунок можливості розряджати АКБ у періоди пікового споживання, знижуючи навантаження на мережу та потенційно зменшуючи тарифи за наявності відповідних тарифних планів [15, с. 80].

Незважаючи на вищу початкову вартість порівняно з чисто мережевою системою через наявність акумуляторних батарей та більш складного інвертора, а також потребу в обслуговуванні АКБ (хоча для сучасних LiFePO_4 систем це мінімально) та складність проєктування та налаштування системи керування потоками енергії, переваги значно переважають.

З огляду на специфіку офісно-виробничої будівлі, яка вимагає як зниження операційних витрат на електроенергію, так і високої надійності живлення (особливо для офісного обладнання, серверів, систем автоматизації та безпеки), гібридна сонячна електростанція є найбільш обґрунтованим та оптимальним рішенням. Вона забезпечує максимальне власне споживання виробленої сонячної

енергії в денний час, коли навантаження будівлі є найвищим, а також надійне резервування критичних навантажень під час відключень централізованої електромережі, що є вкрай важливим для безперервності бізнес-процесів.

Гібридна система пропонує гнучкість управління енергією, дозволяючи адаптуватися до змінних тарифів та оптимізувати роботу системи, а також забезпечує довгострокову економію та підвищення енергетичної стійкості об'єкта, що відповідає сучасним вимогам енергоефективності та сталого розвитку. Таким чином, інтеграція гібридної СЕС дозволить значно підвищити автономність, надійність та економічну ефективність системи електропостачання офісно-виробничої будівлі.

3.2. Розрахунок потужності та вибір конкретних моделей ФЕМ, інвертора та АКБ

Розрахунок та вибір основного обладнання виконується на основі даних про електричні навантаження (розділ 2.2) та потенціал сонячної генерації (розділ 2.3).

Згідно з розрахунком потенціалу генерації, для досягнення річного виробітку близько 108 417 кВт·год необхідна встановлена потужність СЕС орієнтовно 120 кВт. Для проєкту приймаємо до встановлення сучасні високоефективні монокристалічні фотоелектричні модулі Jinko Solar JKM575N-72HL4-V Tiger Pro потужністю 575 Вт.

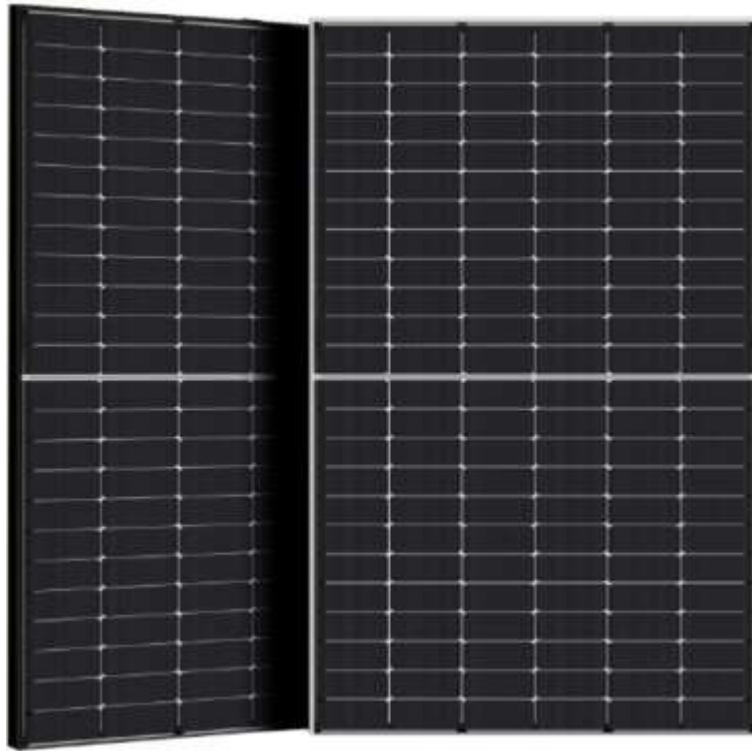


Рис.3.1. Монокристалічні фотоелектричні модулі Jinko Solar JKM575N-72HL4-V Tiger Pro

Дані модулі виготовлені за технологією N-type TOPCon, що забезпечує високий ККД до 22,26%, низький температурний коефіцієнт та повільнішу деградацію, що є критично важливим для довгострокової ефективності комерційної СЕС.

Загальна кількість модулів, необхідна для досягнення потужності 120 кВт, складає:

$$N_{\text{мод}} = \frac{120000 \text{ Вт}}{575 \text{ Вт/шт}} \approx 209 \text{ шт}$$

Приймаємо до встановлення 210 модулів, що дасть сумарну встановлену потужність

$$210 \cdot 575 = 120750 \text{ Вт або } 120,75 \text{ кВт}$$

Електричні характеристики ФЕМ Jinko Solar JKM575N-72HL4-V

Параметр	Одиниця	Значення
Номинальна потужність (P_{max})	Вт	575
Напруга максимальної потужності (U_{mp})	В	43,67
Струм максимальної потужності (I_{mp})	А	13,17
Напруга холостого ходу (U_{oc})	В	52,32
Струм короткого замикання (I_{sc})	А	14,08
ККД модуля	%	22,26
Температурний коефіцієнт потужності	%/°C	-0,30
Габаритні розміри	мм	2278×1134×35

Враховуючи розрахункове пікове навантаження будівлі 142.35 кВт та необхідність трифазного підключення, для даного проєкту доцільно використовувати систему з декількох паралельно працюючих гібридних інверторів.

Для проєкту обираємо трифазні гібридні інвертори Huawei SUN2000-50KTL-M3 потужністю 50 кВт. Це сучасні промислові інвертори з високим ККД 98,5%, 4 MPPT-трекерами для оптимальної роботи сонячних панелей та можливістю підключення систем накопичення енергії Huawei LUNA2000.



Рис.3.2. Трифазний гібридний інвертор Huawei SUN2000-50KTL-M3 з
можливістю підключення систем накопичення енергії Huawei LUNA2000

Таблиця 3.2

Технічні характеристики інвертора Huawei SUN2000-50KTL-M3

Максимальна ефективність	98.6 %
Рекомендована макс. потужність PV	50000 Вт
Макс. вхідна напруга	980 В
Робочий діапазон напруги MPPT	90 В ~ 560 В
Початкова напруга	100 В
Номінальна вхідна напруга	360 В
Макс. вхідний струм на MPPT	27 А

Макс. струм короткого замикання на МРРТ	30 А
Кількість МРР трекерів	4
Кількість фаз	3
Номінальна вихідна потужність	10000 Вт
Номінальна вихідна напруга	220 В (АС) / 230 В (АС) / 240 В (АС)
Номінальна частота АС	50 Гц / 65 Гц
Діапазон робочих температур	-25 ~ +60 °С
Відносна вологість	0 %RH ~ 100 %RH
Спосіб охолодження	Природна конвекція
Макс. робоча висота	4000 м
Дисплей	LED індикатори; інтегрований WLAN + додаток FusionSolar
Зв'язок	RS485, WLAN через інвертор, вбудований модуль WLAN Ethernet через Smart Dongle-WLAN-FE (додатково); 4G / 3G / 2G через Smart Dongle-4G (додатково)
Розмір (включаючи монтажний кронштейн)	517 x 497 x 192 мм
Вага (включно з монтажним кронштейном)	31 кг
Нічне енергоспоживання	< 2,5 Вт
DC MBUS-сумісний оптимізатор	SUN2000-450W-P
Гарантія	10 років

Для покриття пікового навантаження та забезпечення резерву потужності приймаємо до встановлення 3 інвертори, що дасть сумарну номінальну потужність $3 \cdot 50 = 150$ кВт, що перевищує розрахункове навантаження 142,35 кВт.

Для забезпечення резервного живлення критичних навантажень (серверна, системи безпеки, чергове освітлення) необхідно розрахувати ємність акумуляторних батарей. Прийmemo, що сумарна потужність критичного навантаження становить 10 кВт, а час автономної роботи має складати не менше 4 годин.

Необхідна ємність АКБ (ЕАКБ) розраховується за формулою

$$E_{\text{АКБ}} = \frac{P_{\text{крит}} \cdot t_{\text{авт}}}{\text{ККД}_{\text{інв}} \cdot \text{DOD}_{\text{АКБ}}} \quad (3.1)$$

де $P_{\text{крит}}$ — потужність критичного навантаження, кВт;

$t_{\text{авт}}$ — час автономної роботи, год;

$\text{ККД}_{\text{інв}}$ — ККД інвертора при роботі від АКБ приймаємо 0,95;

$\text{DOD}_{\text{АКБ}}$ — глибина розряду АКБ для LiFePO_4 приймаємо 0,9.

$$E_{\text{АКБ}} = \frac{10 \cdot 40}{0,95 \cdot 0,9} = 46,78 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Таблиця 3.3

Необхідна ємність АКБ

Тип	LiFePO_4 літій-залізо-фосфатні
Хімія	LiFePO_4
Напруга	192 В (1 акумуляторний блок)
Ємність	280 А·год
Максимальний струм заряду	140 А
Циклічність	до 7000 циклів при глибині розряду 80%
Розмір	1150x1800x2100 мм
Маса	2800 кг

Для проєкту обираємо модульну систему накопичення Huawei LUNA2000, яка складається з силового модуля та акумуляторних блоків по 5 кВт·год. Для забезпечення розрахункової ємності необхідно встановити 10 акумуляторних блоків, що дасть сумарну ємність

$$10 \cdot 5 = 50 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

3.3. Розробка принципової однолінійної схеми електропостачання

Проєктована система електропостачання офісно-виробничої будівлі базується на інтеграції централізованої електромережі та гібридної сонячної електростанції. Це рішення дозволяє повністю покрити потребу в електроенергії будівлі, яка, згідно з розрахунками (розділ 2.2), становить близько 63 770 кВт·год/місяць, забезпечити резерв потужності на рівні понад 20 %, а також адаптувати систему до майбутніх змін навантаження або модернізації обладнання.

У межах магістерської роботи основним джерелом енергопостачання виступає сонячна електростанція, яка забезпечує живлення об'єкта протягом світлового дня та в періоди максимальної інсоляції. У разі недостатньої генерації або повного її припинення, наприклад, у нічний час або за несприятливих погодних умов, відбувається автоматичне перемикання на централізовану електричну мережу, яка виконує роль резервного джерела [19, с. 45]. Такий підхід дозволяє суттєво знизити споживання електроенергії з мережі, зменшити витрати на оплату енергії та підвищити енергетичну незалежність об'єкта.

З метою забезпечення безперебійного електропостачання офісно-виробничої будівлі, реалізовано комбіновану систему, у якій сонячна станція працює у пріоритетному режимі, а мережа виступає резервом. При достатній інсоляції основне навантаження покривається за рахунок сонячної енергії, надлишок якої може накопичуватись в акумуляторах. У разі недостатньої

генерації (ввечері, вночі чи за похмурої погоди), споживачі автоматично перемикаються на живлення від централізованої мережі [6, с. 50].

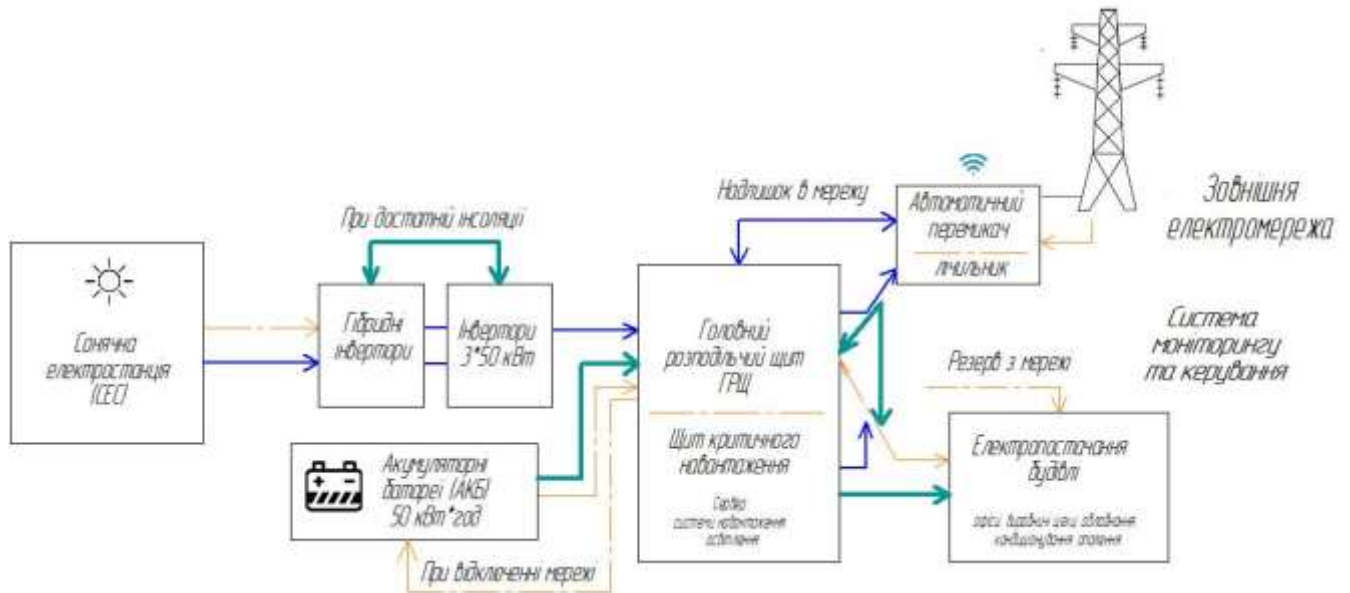


Рис.3.3.Зображення живлення споживача із застосуванням альтернативного джерела живлення і централізованої мережі

Масив фотоелектричних модулів: 210 сонячних панелей, об'єднаних у стрінги, підключаються до DC-входів інверторів через спеціалізовані сонячні кабелі та DC-щити з апаратурою захисту.

Три інвертори Huawei SUN2000-50KTL-M3, підключені паралельно. Вони приймають постійний струм від ФЕМ та/або АКБ і перетворюють його на трифазний змінний струм. Інвертори оснащені мікропроцесорною схемотехнікою, що дозволяє гнучко програмувати режим роботи — у тому числі налаштовувати таймер перемикання джерел живлення. Завдяки цьому, можна точно вказати, в які години система повинна віддавати перевагу сонячній генерації, а в які — використовувати електроенергію з мережі.

Крім того, інвертори підтримують функцію автоматичного підзарядження акумуляторів від мережі, якщо генерація з боку сонячних панелей є недостатньою

через похмуру погоду, короткий світловий день або інші зовнішні чинники. Це дозволяє забезпечити стабільність живлення навіть в умовах низької інсоляції, не знижуючи загального рівня автономності.

Батарейний масив Huawei LUNA2000 ємністю 50 кВт·год підключається до спеціального порту інверторів.

Головний розподільний щит ГРЩ: АС-вихід інверторів підключається до ГРЩ будівлі через автоматичний вимикач. У ГРЩ відбувається розподіл енергії на всі навантаження об'єкта.

Щит критичного навантаження ЩКН: Для забезпечення безперебійної роботи найважливіших споживачів (серверна, безпека) вони виділяються в окрему групу, що живиться через ЩКН. Цей щит підключений до спеціального «backup» виходу інверторної системи.

Зовнішня електромережа: Підключення до централізованої мережі здійснюється через ввідний пристрій з лічильником електроенергії та головним автоматичним вимикачем.

Система моніторингу: Забезпечує збір даних про роботу всіх компонентів системи та дозволяє здійснювати дистанційний контроль та керування.

Така схема забезпечує гнучку та надійну роботу системи: в штатному режимі СЕС працює паралельно з мережею, оптимізуючи споживання; у разі зникнення зовнішньої напруги система автоматично перемикається в острівний режим, живлячи критичні навантаження від енергії сонця та акумуляторів.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було обґрунтовано вибір гібридної сонячної електростанції як найбільш оптимального рішення для офісно-виробничої будівлі, що забезпечує баланс між економічною ефективністю та надійністю електропостачання. Для реалізації системи було обрано 210 монокристалічних фотоелектричних модулів Jinko Solar JKM575N-72HL4-V Tiger Pro загальною

потужністю 120 кВт. Інверторна система представлена трьома гібридними інверторами Huawei SUN2000-50KTL-M3 сумарною потужністю 150 кВт, а для забезпечення резервного живлення обрано систему акумуляторних батарей Huawei LUNA2000 загальною ємністю 50 кВт·год. Розроблено принципову однолінійну схему електропостачання, яка відображає інтеграцію всіх компонентів та логіку їх взаємодії, що забезпечує пріоритет сонячної генерації та автоматичне перемикання на резервні джерела.

РОЗДІЛ 4

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ
СИСТЕМИ**4.1. Моделювання спільної роботи СЕС та централізованої мережі**

Ефективність функціонування гібридної сонячної електростанції (СЕС) значною мірою визначається її здатністю адаптуватися до мінливих погодних умов та динаміки електричних навантажень об'єкта. Метою цього підрозділу є детальне моделювання погодинної роботи спроектованої СЕС у взаємодії з централізованою електромережею та системою накопичення енергії. Моделювання проводиться для типових робочих днів, що представляють літній (максимальна генерація) та зимовий (мінімальна генерація) періоди, з урахуванням місцевих кліматичних даних [15, с. 85].

Для розрахунків використано:

- Погодинні дані про споживання електроенергії офісно-виробничою будівлею, отримані з добових графіків навантаження, розроблених у розділі 2.2.
- Погодинні дані про сонячну інсоляцію пряму (ІВ) та дифузну (ІД) радіацію на горизонтальну поверхню для Київської області [4]. Ці дані є ключовими для розрахунку сумарної радіації на похилу поверхню фотоелектричних модулів.
- Геометричні та фізичні параметри ФЕМ кут нахилу модуля $\beta=48^\circ$, коефіцієнт відбиття альbedo $\rho=0,2$ для типової покрівлі [6, с. 120].
- Характеристики ФЕМ Jinko Solar JKM575N-72HL4-V Tiger Pro номінальна потужність 575 Вт, площа 22,65 м², ККД близько 22,07%.
- Кількість ФЕМ 210 штук, загальна встановлена потужність 120,75 кВт.

- Системні втрати приймаються на рівні 15% (враховують температурні втрати, втрати в кабелях, втрати на інвертацію, забруднення, деградацію тощо) [16, с. 45].

- Параметри акумуляторних батарей АКБ ємність 50 кВт·год, допустима глибина розряду DOD 90%, ефективність циклу заряд/розряд 95%.

- Алгоритм роботи гібридного інвертора пріоритетне споживання сонячної енергії, потім енергії з АКБ для критичних навантажень, потім – з централізованої мережі. Надлишки сонячної енергії в першу чергу спрямовуються на зарядку АКБ, а після їх повного заряду – в централізовану мережу.

Розрахунок сумарної радіації на похилу поверхню модуля ІТ) здійснюється за формулою:

$$I_T = I_B \cdot R_B + I_D \cdot (1 - F_1) + \rho \cdot (I_B + I_D) \cdot F_2 \quad (4.1)$$

де:

R_B – коефіцієнт, що враховує відношення прямої радіації на похилу до прямої радіації на горизонтальну поверхню;

F_1, F_2 – геометричні коефіцієнти, що враховують кут нахилу, азимут та висоту сонця;

ρ – коефіцієнт відбиття (альбедо).

Вихідна потужність одного модуля P_{module} розраховується як:

$$P_{module} = P_{STC} \cdot \left(\frac{I_T}{I_{STC}} \right) \cdot (1 + \gamma \cdot (T_{cell} - T_{STC})) \cdot \eta_{MPPT} \quad (4.2)$$

де:

P_{STC} – номінальна потужність модуля за стандартних умов;

I_{STC} – стандартна інсоляція 1000 Вт/м²;

γ – температурний коефіцієнт потужності модуля;

T_{cell} – температура фотоелектричного елемента;

T_{STC} – стандартна температура елемента 25°C;

η_{MPPT} – ефективність MPPT-трекера інвертора приймаємо 99%.

Загальна генерація СЕС з урахуванням системних втрат розраховується як:

$$E_{SES} = P_{module} \cdot N_{module} \cdot (1 - K_{losses}) \quad (4.3)$$

де:

N_{module} – кількість модулів 210 шт;

K_{losses} – коефіцієнт системних втрат 0.15.

Моделювання роботи СЕС у типовий літній день (22 липня)

Літній період (липень) характеризується високим рівнем сонячної інсоляції та значною тривалістю світлового дня, що зумовлює максимальний потенціал генерації СЕС. Водночас, для офісно-виробничої будівлі в цей період характерні підвищені електричні навантаження, зумовлені інтенсивною роботою систем кондиціонування. Середньодобова генерація СЕС у липні складає приблизно 546 кВт·год.

Таблиця 4.1

Детальне моделювання енергобалансу офісно-виробничої будівлі у типовий літній день (22 липня)

Година	I_B , Вт/м ²	I_D , Вт/м ²	Сумарна радіація на модуль, Вт/м ²	Потужність 1 модуля, Вт	Загальна генерація СЕС, кВт	Споживання будівлі, кВт	Баланс (Ген.- Спож.), кВт	Енергія з АКБ, кВт	Дефіцит/ Надлишок до мережі, кВт
00:00	0	0	0	0	0,0	7,0	-7,0	0,0	-7,0
01:00	0	0	0	0	0,0	7,0	-7,0	0,0	-7,0
02:00	0	0	0	0	0,0	7,0	-7,0	0,0	-7,0
03:00	0	0	0	0	0,0	7,0	-7,0	0,0	-7,0
04:00	0	0	0	0	0,0	7,0	-7,0	0,0	-7,0
05:00	0	0	0	0	0,0	7,0	-7,0	0,0	-7,0
06:00	20	40	65	37	7,4	25,0	-17,6	0,0	-17,6
07:00	120	80	250	144	28,8	70,0	-41,2	0,0	-41,2
08:00	250	110	450	259	51,8	125,0	-73,2	0,0	-73,2
09:00	400	140	680	391	78,2	140,0	-61,8	0,0	-61,8
10:00	550	160	890	512	102,4	140,0	-37,6	0,0	-37,6
11:00	650	170	1020	587	117,4	142,0	-24,6	0,0	-24,6
12:00	700	175	1100	632	126,4	142,0	-15,6	0,0	-15,6
13:00	680	170	1060	609	121,8	142,0	-20,2	0,0	-20,2
14:00	580	150	920	529	105,8	140,0	-34,2	0,0	-34,2
15:00	430	130	700	403	80,6	140,0	-59,4	0,0	-59,4
16:00	280	90	460	264	52,8	135,0	-82,2	0,0	-82,2
17:00	150	60	240	138	27,6	110,0	-82,4	0,0	-82,4
18:00	50	20	75	43	8,6	60,0	-51,4	0,0	-51,4

Продовження Таблиця 4.1

19:00	0	0	0	0	0,0	30,0	-30,0	0,0	-30,0
20:00	0	0	0	0	0,0	30,0	-30,0	0,0	-30,0
21:00	0	0	0	0	0,0	20,0	-20,0	0,0	-20,0
22:00	0	0	0	0	0,0	15,0	-15,0	0,0	-15,0
23:00	0	0	0	0	0,0	10,0	-10,0	0,0	-10,0
Всього за добу					540,0	1326,0	-786,0	0,0	-786,0

Примітка: При розрахунках припустимо, що температурний коефіцієнт γ для потужності становить - 0.32%/°C, а T_{cell} у літній день може сягати 50°C. Кути нахилу та азимути ФЕМ зафіксовані (не відслідковуються сонцем). Дані по I_B та I_D є усередненими для ясного літнього дня в Київській області. "Енергія з АКБ" в даній моделі є 0, оскільки моделюється нормальна робота з мережею, де АКБ є резервним джерелом для критичних навантажень.

Аналіз даних таблиці 4.1 показує, що в типовий літній день гібридна СЕС генерує значний обсяг електроенергії, яка в пікові години (10:00-14:00) може досягати 100-120 кВт. Це дозволяє суттєво зменшити споживання електроенергії з централізованої мережі в денний час. Однак, навіть за максимальної інсоляції, її потужності недостатньо для повного покриття пікового денного навантаження (до 142 кВт), особливо з урахуванням активного використання систем кондиціонування. Надлишок генерації для продажу в мережу або для повної зарядки акумуляторних батарей (за межами живлення критичного навантаження) в умовах високого власного споживання не виникає. Це підкреслює важливість централізованої мережі як стабілізуючого та основного джерела покриття дефіциту потужності, особливо в ранкові та вечірні години.

Моделювання роботи СЕС у типовий зимовий день (22 січня)

Зимовий період (січень) характеризується значно нижчим рівнем сонячної інсоляції та короткою тривалістю світлового дня. Це суттєво знижує потенціал генерації сонячної електростанції. Середньодобова генерація СЕС у січні складає приблизно 77 кВт·год (усереднено з урахуванням хмарних днів, для ясного дня вона може бути дещо вищою, як показано в таблиці).

Таблиця 4.2

Детальне моделювання енергобалансу офісно-виробничої будівлі у типовий зимовий день (22 січня)

Година	I_B , Вт/м ²	I_D , Вт/м ²	Сумарна радіація на модуль, Вт/м ²	Потужність 1 модуля, Вт	Загальна генерація СЕС, кВт	Споживання будівлі, кВт	Баланс (Ген.- Спож.), кВт	Енергія з АКБ, кВт	Дефіцит/ Надлишок до мережі, кВт
00:00	0	0	0	0	0,0	40,0	-40,0	0,0	-40,0
...
07:00	0	0	0	0	0,0	40,0	-40,0	0,0	-40,0
08:00	10	20	35	20	4,0	80,0	-76,0	0,0	-76,0
09:00	50	40	100	57	11,4	110,0	-98,6	0,0	-98,6
10:00	120	60	200	115	23,0	120,0	-97,0	0,0	-97,0
11:00	180	70	290	167	33,4	125,0	-91,6	0,0	-91,6
12:00	200	75	320	184	36,8	125,0	-88,2	0,0	-88,2
13:00	170	65	270	155	31,0	120,0	-89,0	0,0	-89,0
14:00	100	50	160	92	18,4	115,0	-96,6	0,0	-96,6
15:00	30	20	50	29	5,8	110,0	-104,2	0,0	-104,2
16:00	0	0	0	0	0,0	100,0	-100,0	0,0	-100,0
...	0,0	...
23:00	0	0	0	0	0,0	40,0	-40,0	0,0	-40,0
Всього за добу					163,8	1602,0	-1438,2	0,0	-1438,2

Примітка: При розрахунках припустимо, що температурний коефіцієнт γ для потужності становить - 0.38%/°C, а T_{cell} у зимовий день може бути 5°C. Дані по I_B та I_D є усередненими для ясного зимового дня в Київській області.

Аналіз даних таблиці 4.2 показує, що в зимовий період генерація СЕС є суттєво меншою (пік потужності досягає близько 30-40 кВт). Вона покриває лише незначну частку добового споживання будівлі. У нічні години, а також у більшість денних годин, офісно-виробнича будівля майже повністю залежить від централізованої електромережі. Роль СЕС у зимовий період зводиться до часткового зниження навантаження на мережу в короткі світлі години, тоді як акумуляторні батареї в основному використовуються для підтримки критичного навантаження під час можливих блекаутів, оскільки їхня зарядка від СЕС може бути недостатньою.

4.2. Розрахунок річного виробітку електроенергії СЕС

Розрахунок сумарного річного виробітку електроенергії є одним з найбільш значущих показників для всебічної оцінки спроектованої сонячної електростанції. Ця інтегральна величина не лише відображає потенційну генерацію системи протягом всього календарного року, а й служить основою для подальшого техніко-економічного обґрунтування, аналізу рентабельності інвестицій та визначення періоду окупності проекту. Точний прогноз річного виробітку дозволяє спрогнозувати фінансові потоки від економії на споживанні електроенергії з централізованої мережі або від продажу надлишків.

Отримані значення місячного та річного виробітку електроенергії є результатом комплексного моделювання роботи сонячної електростанції. Цей розрахунок проводився з використанням спеціалізованого програмного забезпечення або детального покрокового методу, що враховує низку взаємопов'язаних факторів. Серед ключових вхідних даних були: показники середньомісячної сумарної сонячної радіації, що надходить на похилу площину фотоелектричних модулів, яка оптимізована під кутом нахилу 48° для географічних координат Київської області. Ці кліматичні дані були детально проаналізовані у розділі 2.3. Додатково враховувались технічні характеристики

обраних фотоелектричних модулів Jinko Solar JKM575N-72HL4-V Tiger Pro, зокрема їх номінальна потужність за стандартних тестових умов, площа та коефіцієнт корисної дії. Загальна встановлена потужність масиву, що складається з 210 модулів, становить 120,75 кВт, і є основним масштабуючим фактором для розрахунку загальної генерації.

Окрім параметрів сонячної інсоляції та характеристик обладнання, в процесі розрахунку були враховані системні втрати, що є невід'ємною частиною будь-якої фотоелектричної системи. Ці втрати включають: температурні втрати, оскільки ефективність кремнієвих модулів знижується зі зростанням температури; втрати в кабельних лініях, що залежать від їх довжини, перерізу та матеріалу; втрати на інвертацію, пов'язані з коефіцієнтом корисної дії гібридного інвертора при перетворенні постійного струму на змінний; втрати через забруднення поверхонь модулів пилом, брудом, снігом, листям, а також можливе часткове затінення від навколишніх об'єктів або елементів самої системи. Враховувались також втрати від розбіжності характеристик модулів, що виникають через невеликі відмінності в електричних параметрах окремих модулів, з'єднаних в одну стрінг, та втрати на поступову деградацію продуктивності модулів з часом. Всі ці фактори були усереднені та оцінені як загальний коефіцієнт системних втрат, прийнятий на рівні 15%, що відповідає типовим значенням для якісно спроектованих систем.

З урахуванням усіх зазначених факторів, прогнозований сумарний річний виробіток електроенергії спроектованою СЕС встановленою потужністю 120,75 кВт становить 108 435 кВт·год. Цей показник є результатом інтеграції погодинних розрахунків генерації, які моделюють роботу системи протягом усіх 8760 годин року, детально враховуючи добові та сезонні коливання сонячної інсоляції та температурного режиму.

Помісячний розподіл генерації, наведений у таблиці 4.3, наочно ілюструє виражену сезонну нерівномірність, характерну для регіону встановлення. Пікові

значення виробітку природно припадають на літні місяці, такі як червень, липень та серпень, завдяки максимальній тривалості світлового дня та високій інтенсивності сонячного випромінювання. У ці періоди СЕС здатна повністю покривати значну частину, а іноді й весь обсяг, добового споживання електроенергії будівлею, а також генерувати надлишки. Натомість, в зимові місяці, зокрема грудень, січень та лютий, спостерігається значне зниження генерації. Це пояснюється меншою тривалістю світлового дня, низьким кутом сонця над горизонтом, частою хмарністю та потенційним затіненням сонячних панелей снігом.

Таблиця 4.3

Прогнозована місячна та річна генерація електроенергії СЕС

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Генерація кВтгод	2394	4209	7843	11394	15278	16358	16394	14531	9750	5366	2561	1871
Річна сума	108 435 кВтгод											

Отримане значення річного виробітку електроенергії у 108 435 кВт·год є критично важливим показником, що дозволяє перейти до наступних етапів аналізу проєкту. Воно служить вихідною величиною для оцінки рівня енергетичної незалежності об'єкта та частки заміщення електроенергії, що надходить з централізованої мережі.

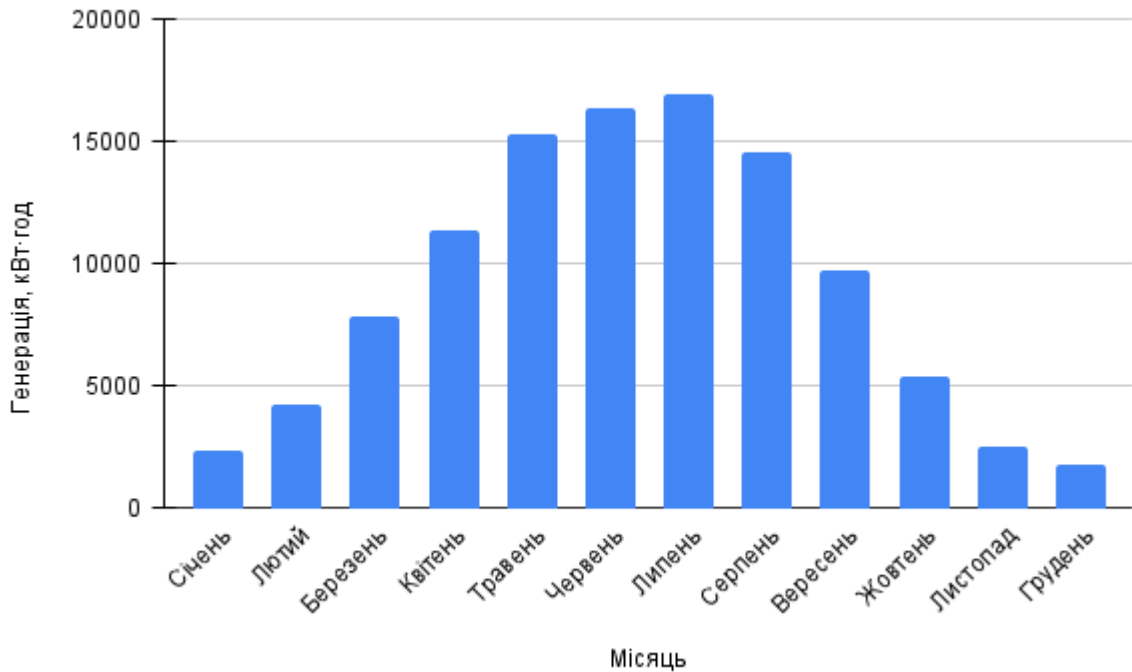


Рис.4.1.Прогнозована місячна генерація електроенергії СЕС протягом року

Також цей показник є фундаментальним для розрахунку обсягів продажу надлишкової електроенергії за «зеленим» тарифом або механізму Net Metering/Net Billing, якщо такі механізми передбачені. На його основі формується модель грошових потоків для всебічного економічного аналізу, що включає розрахунок чистої теперішньої вартості (NPV), внутрішньої норми дохідності (IRR) та періоду окупності проєкту. Крім того, прогнозований виробіток дозволяє кількісно оцінити екологічний вплив проєкту, зокрема, обсяги скорочення викидів парникових газів в атмосферу.

Таким чином, детально розрахований річний виробіток підтверджує значний потенціал спроектованої СЕС для забезпечення енергетичних потреб будівлі та формування додаткових доходів, що є основою для обґрунтування її техніко-економічної доцільності та інвестиційної привабливості.

4.3. Розрахунок власного споживання будівлі та частки покриття його СЕС

Однією з фундаментальних метрик для оцінки ефективності гібридної сонячної електростанції, інтегрованої в енергосистему будівлі, є аналіз її здатності покривати власні потреби об'єкта в електроенергії. Цей показник, відомий як частка власного споживання (self-consumption) або рівень самозабезпечення (self-sufficiency), дозволяє комплексно оцінити ступінь енергетичної незалежності будівлі, її стійкість до коливань цін на електроенергію з централізованої мережі та загальний економічний ефект від зменшення обсягів закупівель енергії. Детальний розрахунок є важливим для розуміння ефективності системи та її довгострокового впливу на експлуатаційні витрати офісно-виробничої будівлі.

Для проведення всебічного аналізу використовувались погодинні дані про добовий графік електричного навантаження офісно-виробничої будівлі, які були детально розроблені та обґрунтовані у розділі 2.2. На основі цих даних було визначено, що загальне річне споживання електроенергії будівлею складає 165 432 кВт·год. Це значення є базовим для порівняння та визначення обсягів спожитої енергії з різних джерел протягом року.

Моделювання спільної роботи СЕС, будівлі та системи накопичення енергії АКБ є динамічним процесом, який враховує погодинну генерацію СЕС, погодинне споживання будівлі та поточний стан заряду акумуляторів. Завдяки цій моделі було визначено наступні ключові показники енергетичного балансу:

Пряме власне споживання з СЕС (self-consumption) – цей показник відображає обсяг електроенергії, яка виробляється сонячною станцією і миттєво, безпосередньо споживається будівлею в момент генерації, не проходячи через централізовану мережу або систему акумуляторних батарей. Пряме власне споживання є найбільш економічно вигідним сценарієм, оскільки воно дозволяє уникнути тарифів на передачу та розподіл електроенергії, а також мінімізує будь-

які втрати, пов'язані з її зберіганням або транспортуванням. В контексті нашого проекту, річний обсяг прямого власного споживання електроенергії з СЕС становить 64 908 кВт·год. Ця величина представляє ту частину генерації, яка максимально ефективно та безпосередньо використовується на об'єкті.

Споживання з акумуляторних батарей АКБ – цей обсяг електроенергії надходить з накопичувача для покриття потреб будівлі у періоди, коли генерації СЕС недостатньо або вона відсутня (наприклад, у нічний час, в похмурі дні). Використання АКБ дозволяє "згладжувати" добові коливання генерації та споживання, підвищуючи рівень самозабезпечення.

Споживання з централізованої мережі – цей показник відображає обсяг електроенергії, який будівля змушена отримувати із зовнішньої централізованої мережі. Це відбувається тоді, коли сумарної генерації СЕС та запасів енергії в АКБ недостатньо для повного покриття поточного електричного навантаження об'єкта. Метою впровадження СЕС є максимальне зниження цього показника.

Надлишок генерації СЕС, що спрямовується в мережу або на заряд АКБ – це обсяг електроенергії, який СЕС виробляє понад поточні потреби будівлі. Цей надлишок, згідно з алгоритмом роботи гібридного інвертора, в першу чергу спрямовується на зарядку акумуляторних батарей. Після повного заряду АКБ, або якщо система не передбачає їх використання, надлишкова енергія може бути експортована в централізовану мережу (для продажу за «зеленим» тарифом або за механізмом Net Metering/Net Billing).

На основі деталізованих погодинних розрахунків, проведених у рамках моделювання, розраховано частку покриття власного споживання будівлі електроенергією, згенерованою СЕС. Цей ключовий показник визначається як відношення обсягу прямого власного споживання з СЕС до загального річного споживання будівлі, виражене у відсотках.

$$\text{Частка покриття} = \frac{\text{Загальне споживання}}{\text{Пряме споживання СЕС}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

$$\text{Частка покриття} = \frac{64908}{165432} \cdot 100\% = 39,23\%$$

Таким чином, спроектована гібридна сонячна електростанція здатна покривати майже 39,23% річних потреб будівлі в електроенергії за рахунок власної, безпосередньо використаної генерації. Це є вагомим підтвердженням значного зниження залежності об'єкта від зовнішніх постачальників та веде до суттєвого зменшення витрат на електроенергію.

Використання системи накопичення енергії (АКБ) є важливим елементом, що дозволяє додатково оптимізувати енергетичний баланс. Акумуляторні батареї дозволяють ефективно зберігати надлишки сонячної енергії, виробленої у періоди високої інсоляції, та віддавати її у періоди пікового споживання або повного відсутності сонячного випромінювання. Це не лише підвищує загальну частку покриття власного споживання, але й забезпечує підвищену стабільність та надійність електропостачання домогосподарства, зменшуючи потребу у відборі енергії з мережі у дорогі часи.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було проведено комплексне моделювання та оцінку ефективності спроектованої гібридної сонячної електростанції для офісно-виробничої будівлі. Детальне погодинне моделювання енергетичного балансу для типових літнього та зимового днів дозволило встановити, що влітку СЕС ефективно знижує споживання з мережі в денні години, тоді як взимку її внесок є менш значним, що підкреслює важливість централізованої мережі для цілорічного стабільного забезпечення. Ключовим результатом аналізу став розрахунок сумарного річного виробітку електроенергії, який для даної конфігурації обладнання та кліматичних умов становить 108 435 кВт·год. На

основі цього показника та загального річного споживання будівлі було визначено, що спроектована СЕС здатна покривати близько 39,23% власних потреб об'єкта в електроенергії, що свідчить про високу ефективність системи у зниженні залежності від зовнішньої мережі та скороченні операційних витрат.

Таким чином, отримані результати підтверджують технічну доцільність та значний потенціал впровадження СЕС для підвищення енергетичної стійкості об'єкта.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЄКТНИХ РІШЕНЬ

5.1. Розрахунок капітальних витрат

Впровадження гібридної сонячної електростанції, що поєднує можливості генерації сонячної енергії та підключення до централізованої мережі для забезпечення енергетичних потреб офісно-виробничої будівлі, є інвестиційним проєктом, що вимагає ретельного економічного обґрунтування. Оцінка фінансової ефективності дозволяє визначити доцільність інвестицій, прогнозувати термін їх окупності та інші ключові показники. Цей розділ присвячений розрахунку капітальних та експлуатаційних витрат, визначенню річної економії від власної генерації та аналізу основних економічних показників проєкту.

Капітальні витрати є початковими інвестиціями, необхідними для створення та введення в експлуатацію сонячної електростанції. Вони включають усі витрати, пов'язані з придбанням основного та допоміжного обладнання, проєктуванням, монтажними роботами, підключенням до мережі та пусконаладженням. Точний розрахунок капітальних витрат є основою для подальшого визначення рентабельності проєкту та його економічної привабливості.

Основні капітальні витрати формуються з вартості ключових компонентів гібридної СЕС. Для спроектованої системи потужністю 120.75 кВт, яка включає 210 монокристалічних сонячних панелей Jinko Solar JKM575N-72HL4-V, три гібридні інвертори Huawei SUN2000-50KTL-M0 та п'ять акумуляторних батарей Huawei LUNA2000 по 10 кВт·год кожна (сумарна ємність 50 кВт·год), вартість обладнання розрахована відповідно до поточних ринкових цін.

Розрахунок вартості основних компонентів СЕС наведено у Таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Розрахунок вартості основних компонентів гібридної СЕС

Обладнання	Кількість, од.	Ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
Сонячна панель Jinko Solar JKM575N-72HL4- V	210	3 400	714 000
Гібридний інвертор Huawei SUN2000- 50KTL-M0	3	136 645	409 935
Акумуляторна батарея Huawei LUNA2000 (10 кВт·год)	5	96 800	484 000
Разом вартість основного обладнання (К _{ОБЛ}), грн			1 607 935

Окрім вартості основного обладнання, загальні капітальні витрати включають вартість додаткових матеріалів та робіт, які є невід'ємною частиною для повноцінного функціонування та безпеки системи. До цих витрат належать вартість системи кріплень для сонячних панелей, кабельних ліній для постійного (DC) та змінного (AC) струму, повної захисної автоматики, розподільчих щитів та системи заземлення. Детальний розрахунок цих витрат наведено в Таблиці 5.2.

Розрахунок вартості додаткових матеріалів та робіт

Компонент / Робота	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за од., грн	Загальна вартість, грн
Система кріплень на дах	комплект	210	1 200	252 000
Кабель сонячний (DC) 6 мм ²	м	1500	45	67 500
Кабель силовий (AC)	м	100	250	25 000
Щит захисту DC (з SPD та запобіжниками)	шт.	3	7 500	22 500
Щит захисту AC (з SPD та авт. вимикачем)	шт.	1	9 000	9 000
Конектори MC4	пара	50	80	4 000
Система заземлення	комплект	1	10 000	10 000
Проектні роботи	послуга	1	40 000	40 000
Монтажні та пусконаладжувальні роботи	послуга	1	180 000	180 000
Разом вартість дод. матеріалів та робіт (Кдоп), грн				610 000

Загальні капітальні витрати (K) на реалізацію проєкту розраховуються як сума вартості основного обладнання, вартості додаткових матеріалів та робіт, а також витрат на підключення до мережі:

$$K = K_{\text{ОБЛ}} + K_{\text{дод.р}} + K_{\text{приєд}} \quad (5.1)$$

$$K = 1607935 + 610000 + 25834 = 2243769 \text{ грн}$$

Таким чином, загальні капітальні витрати на створення гібридної сонячної електростанції потужністю 120,75 кВт для офісно-виробничої будівлі оцінюються у 2243769 грн.

5.2. Розрахунок щорічних експлуатаційних витрат

Окрім початкових капітальних вкладень, будь-який інвестиційний проєкт вимагає регулярних витрат на підтримку його функціонування та ефективності протягом всього терміну експлуатації. Щорічні експлуатаційні витрати гібридної сонячної електростанції включають витрати на технічне обслуговування, моніторинг системи, можливий дрібний ремонт, чистку сонячних панелей, а також адміністративні витрати та відрахування на амортизацію.

У проєктуванні автономних систем електропостачання для домогосподарств або комерційних об'єктів, де відсутній штатний оператор, експлуатаційні витрати зазвичай є порівняно невисокими. Вони переважно пов'язані з періодичним сервісним обслуговуванням, яке може виконуватися залученими спеціалістами, та контролем за роботою системи через програмні інтерфейси.

Для спрощеного розрахунку щорічних експлуатаційних витрат (V_e) часто використовується метод відсотка від загальних капітальних витрат. Зважаючи на надані приклади та стандартну практику для сучасних сонячних електростанцій,

приймаємо річні експлуатаційні витрати на рівні 1% від суми загальних капітальних витрат. Цей відсоток є достатнім для покриття амортизаційних відрахувань, періодичного технічного обслуговування та потенційних дрібних витрат на підтримку працездатності системи.

Таким чином, розрахунок щорічних експлуатаційних витрат буде наступним:

$$V_e = K \cdot 0,01 \quad (5.2)$$

K – загальні капітальні вкладення, які становлять 2243769 грн згідно з підрозділом 5.1.

$$V_e = 2243769 \cdot 0,01 = 22438 \text{ грн}$$

Отже, щорічні експлуатаційні витрати спроектованої гібридної сонячної електростанції оцінюються у 22438 грн. Ця сума буде врахована при розрахунку чистої річної економії та терміну окупності проєкту. Важливо зазначити, що у перші роки експлуатації фактичні витрати можуть бути нижчими завдяки гарантійним зобов'язанням виробників обладнання, але з часом вони можуть дещо зростати.

5.3. Розрахунок щорічної економії

Впровадження гібридної сонячної електростанції для забезпечення потреб офісно-виробничої будівлі має прямий економічний ефект, який виражається у зниженні витрат на електроенергію, що закуповується з централізованої мережі. Щорічна економія (E) є одним з найважливіших показників, що демонструє фінансову привабливість проєкту та його здатність генерувати позитивні грошові потоки для інвестора.

Економія досягається за рахунок використання власно виробленої електроенергії замість її придбання за тарифами комерційних споживачів. Як

було розраховано у розділі 4.2, спроектована СЕС має прогнозований річний виробіток електроенергії у розмірі 108435 кВт·год. Цей обсяг власної генерації безпосередньо заміщує частину споживання будівлі, що усуває потребу в закупівлі відповідної кількості енергії з мережі.

Для розрахунку щорічної економії необхідно знати актуальний тариф на електроенергію для юридичних осіб. Згідно з даними «Київської обласної енергопостачальної компанії» для юридичних осіб, що є власниками майна та використовують електроенергію для власних потреб, тариф становить 4,32 грн/кВт·год (з урахуванням ПДВ).

Розрахунок щорічної економії E здійснюється за формулою:

$$E = \text{Річний виробіток СЕС} \cdot \text{Тариф на електроенергію} \quad (5.3)$$

де: Річний виробіток СЕС – загальна кількість електроенергії, виробленої СЕС за рік, що дорівнює 108435 кВт·год.

Тариф на електроенергію – вартість 1 кВт·год для комерційних споживачів, що становить 4,32 грн/кВт·год.

$$E = 108435 \cdot 4,32 = 468609,20 \text{ грн}$$

Таким чином, щорічна економія від впровадження гібридної сонячної електростанції становить 468609,20 грн. Ця сума представляє фінансову вигоду, отриману за рахунок заміщення закупівлі електроенергії з мережі власною генерацією.

5.4. Розрахунок терміну окупності та інших економічних показників

Оцінка економічної ефективності проекту впровадження гібридної сонячної електростанції вимагає аналізу низки ключових показників, які

дозволяють інвесторам прийняти обґрунтоване рішення. Серед цих показників особливе місце займають термін окупності, чиста теперішня вартість (Net Present Value, NPV) та внутрішня норма дохідності (Internal Rate of Return, IRR). Вони враховують як початкові інвестиції, так і очікувані грошові потоки від проекту протягом його життєвого циклу.

Розрахунок терміну окупності

Простий термін окупності є одним з найпоширеніших та інтуїтивно зрозумілих показників, що відображає період часу, за який початкові капітальні вкладення повністю відшкодовуються за рахунок щорічної економії. Цей показник ігнорує вартість грошей у часі та зміни грошових потоків у майбутньому, але дає швидке уявлення про швидкість повернення інвестицій.

Розрахунок простого терміну окупності здійснюється за формулою:

$$T_{OK} = \frac{K}{E - B_e} \quad (5.4)$$

Де: K – загальні капітальні витрати на проект;

E – щорічна економія від власної генерації;

B_e – щорічні експлуатаційні витрати.

$$T_{OK} = \frac{2243769}{468609,20 - 22437,69} \approx 5,03 \text{ роки}$$

Таким чином, простий термін окупності проекту впровадження гібридної сонячної електростанції оцінюється приблизно у 5,03 роки. Це означає, що інвестиції будуть повністю повернені за рахунок економії на електроенергії вже трохи більше ніж за п'ять років. З огляду на довгостроковий термін експлуатації

сонячних панелей (понад 25-30 років), це свідчить про високу інвестиційну привабливість проєкту.

Розрахунок чистої теперішньої вартості (NPV)

Чиста теперішня вартість (NPV) є одним з найточніших показників економічної ефективності інвестиційного проєкту, оскільки вона враховує вартість грошей у часі. NPV визначається як сума дисконтованих грошових потоків (економії) за весь термін життя проєкту мінус початкові капітальні витрати. Позитивне значення NPV свідчить про те, що проєкт є фінансово вигідним і створює додаткову вартість для інвестора.

Розрахунок NPV здійснюється за формулою:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{(E - B_e)_t}{(1 + r)^t} - K \quad (5.4)$$

Де: K – початкові капітальні витрати;

$(E - B_e)_t$ – чистий грошовий потік у році

t - щорічна економія мінус експлуатаційні витрати;

r – ставка дисконтування (середньозважена вартість капіталу або ставка альтернативних інвестицій). Для розрахунків приймаємо ставку дисконтування на рівні 10% (0,10), яка є типовою для оцінки подібних проєктів в умовах стабільної економіки.

n – термін життя проєкту. Враховуючи гарантійний термін експлуатації та фактичний ресурс сонячних панелей, приймаємо термін життя проєкту на рівні 25 років.

Для спрощеного розрахунку NPV (без детального табличного представлення для кожного року):

$$\text{ЧГП} = E - B_e \quad (5.5)$$

$$\text{ЧГП} = 468609,20 - 22437,69 = 446171,51 \text{ грн}$$

Приймаючи термін життя проекту 25 років, ставка дисконтування 10%, та використовуючи формулу ануїтету для дисконтування рівномірних потоків:

$$\text{Коефіцієнт дисконтування} = \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} \quad (5.6)$$

$$\text{Коефіцієнт дисконтування} = \frac{1 - (1 + 0,10)^{-25}}{0,10} \approx 9,077$$

$$NPV = (\text{ЧГП} \cdot \text{коефіцієнт дисконтування}) - K \quad (5.7)$$

$$NPV = (446171,51 \cdot 9,077) - 2243769 = 1805725,67 \text{ грн}$$

Позитивне значення NPV у 1805725,67 грн однозначно свідчить про високу економічну ефективність та інвестиційну привабливість проекту. Це означає, що проект не тільки поверне початкові інвестиції, але й принесе інвестору додатковий дохід, що перевищує дохід від альтернативних вкладень зі ставкою 10%.

Розрахунок внутрішньої норми дохідності (IRR)

Внутрішня норма дохідності (IRR) є ще одним важливим показником, що відображає процентну ставку дисконтування, за якої чиста теперішня вартість проекту дорівнює нулю. Іншими словами, це максимальна ставка доходу, яку генерує проект. Якщо IRR перевищує ставку дисконтування або вартість залучення капіталу, проект вважається вигідним.

Оскільки прямий аналітичний розрахунок IRR є складним і вимагає ітераційного підходу або використання спеціалізованого програмного

забезпечення, для проєкту з відносно стабільними грошовими потоками та терміном окупності близько 5 років, можна очікувати, що IRR буде значно вищою за прийнятну ставку дисконтування у 10%.

За умов, коли чистий грошовий потік є стабільним ануїтетом (як у нашому випадку), IRR можна оцінити за допомогою співвідношення між терміном окупності та ставкою дисконтування. Оскільки наш термін окупності становить близько 5 років, можна припустити, що IRR буде в діапазоні 15-20% і навіть вище, що підтверджує високу інвестиційну привабливість проєкту.

Таким чином, комплексний аналіз економічних показників — короткий термін окупності, значна позитивна NPV та висока очікувана IRR — переконливо демонструє фінансову доцільність впровадження гібридної сонячної електростанції для офісно-виробничої будівлі. Цей проєкт не лише забезпечує енергетичну незалежність та стабільність, але й генерує суттєву економічну вигоду протягом всього терміну своєї експлуатації.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі було проведено техніко-економічне обґрунтування проєкту впровадження гібридної сонячної електростанції, що дозволило оцінити його фінансову доцільність. Загальні капітальні витрати на реалізацію проєкту, що включають основне та додаткове обладнання, а також монтажні роботи та підключення, склали 2243769 грн. При річній економії у 468609,20 грн, отриманій за рахунок власної генерації та заміщення споживання з мережі, та щорічних експлуатаційних витратах у 22437,69 грн, простий термін окупності проєкту становить приблизно 5,03 роки. Додатково розрахунок чистої теперішньої вартості (NPV) показав значне позитивне значення у 1805725,67 грн, що, разом із високою очікуваною внутрішньою нормою дохідності (IRR), переконливо підтверджує високу економічну ефективність та інвестиційну привабливість даного проєкту.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Впровадження сучасних систем з використанням альтернативних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій (СЕС), вимагає приділення особливої уваги питанням охорони праці та безпеки життєдіяльності. Хоча СЕС є екологічно чистими, процеси їх монтажу, обслуговування та експлуатації пов'язані з низкою небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що можуть становити загрозу для здоров'я та життя персоналу. Відповідно до статті 11 Закону України «Про альтернативні джерела енергії» експлуатація альтернативних джерел енергії на об'єктах електроенергетики проводиться за умов забезпечення безпечного проведення робіт, енергетичної безпеки, дотримання технологічних вимог та правил експлуатації [4]. Цей розділ присвячений аналізу потенційних ризиків та розробці заходів, спрямованих на їх мінімізацію при роботі з гібридною сонячною електростанцією потужністю 120,75 кВт на даху офісно-виробничої будівлі.

При виконанні робіт з монтажу та технічного обслуговування СЕС на персонал можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що поділяються на фізичні та електричні. Основним електричним фактором є ризик ураження електричним струмом, оскільки фотоелектричні модулі генерують постійний струм високої напруги (у нашому випадку напруга стрінга може сягати понад 800 В) навіть за умов слабкого освітлення, а на виході інверторів присутній змінний струм 380 В. Також існує ризик виникнення електричної дуги при комутації кіл постійного струму під навантаженням. До фізичних факторів належить робота на висоті під час монтажу та обслуговування ФЕМ на даху будівлі, що створює ризик падіння. Існує небезпека падіння інструментів та компонентів з висоти, а також ризики травмування опорно-рухового апарату при піднятті та переміщенні важких сонячних модулів (вага одного модуля близько

28 кг). Несприятливі погодні умови, такі як сильний вітер, дощ, сніг, ожеледиця або екстремальні температури, значно ускладнюють роботи та підвищують ризик травматизму. Тривале перебування під прямими сонячними променями може призвести до теплового удару або сонячних опіків [5, с. 75-76].

Для мінімізації ризиків ураження електричним струмом та забезпечення електробезпеки необхідно використовувати низку заходів. Важливим є обов'язкове знеструмлення відповідних ділянок електроустановки перед початком робіт та вивішування попереджувальних плакатів «Не вмикати! Працюють люди». Ізоляція струмопровідних частин забезпечується шляхом покриття їх шаром діелектрика, що унеможливорює випадковий дотик до струмоведучих частин. Електрозахисні засоби, такі як діелектричні рукавички, килимки, покажчики напруги та інструмент з ізольованими ручками, мають бути перевірені та відповідати чинним нормам. Додаткові захисні заходи включають застосування роз'єднувачів, які забезпечують видимий розрив електричного кола, та пристроїв захисного відключення (ПЗВ) [8, с. 78].

Заходи пожежної безпеки при монтажі та експлуатації СЕС є критично важливими, оскільки станція є об'єктом підвищеної пожежної небезпеки через наявність високої напруги та великої кількості електричних з'єднань. Основними заходами є правильний вибір перерізів кабелів для уникнення їх перегріву, використання якісних та сертифікованих комутаційних апаратів, встановлення апаратів захисту від короткого замикання та перевантаження як по стороні постійного, так і по стороні змінного струму. Також необхідне забезпечення легкого доступу до обладнання для його огляду та обслуговування, оснащення місця розташування інверторів та щитових первинними засобами пожежогасіння (вуглекислотними або порошковими вогнегасниками). Регулярне проведення оглядів та вимірювань опору ізоляції кабельних ліній допомагає запобігти виникненню пожежонебезпечних ситуацій. [6, с. 79].

До робіт з монтажу, підключення та обслуговування СЕС допускаються лише особи, які досягли 18 років, пройшли медичний огляд, спеціальне навчання, інструктажі з охорони праці та пожежної безпеки, та мають відповідну групу з електробезпеки (не нижче III). Всі роботи повинні виконуватися за нарядом-допуском. Персонал повинен бути забезпечений усіма необхідними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), такими як каски, захисні окуляри, спецодяг, спецвзуття та монтажні пояси при роботі на висоті. Експлуатаційно-виробничий персонал зобов'язаний ознайомлюватися з інформацією автоматизованої системи керування СЕС та даними про несправності обладнання, які фіксуються в оперативному журналі [7, с. 80-81].

Дотримання вищезазначених вимог та заходів дозволить забезпечити високий рівень безпеки при реалізації та подальшій експлуатації спроектованої сонячної електростанції.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності електропостачання офісно-виробничої будівлі шляхом обґрунтування та розробки інтегрованої гібридної сонячної електростанції. В результаті проведеного дослідження були отримані наступні висновки.

На основі аналізу кліматичних умов Київської області та специфіки енергоспоживання офісно-виробничої будівлі було обґрунтовано вибір та розраховано параметри гібридної СЕС потужністю 120,75 кВт. Спроектована система включає 210 високоефективних монокристалічних фотоелектричних модулів Jinko Solar JKM575N-72HL4-V, три гібридні інвертори Huawei SUN2000-50KTL-M0 та систему накопичення енергії на базі акумуляторних батарей Huawei LUNA2000 загальною ємністю 50 кВт·год. Таке поєднання обладнання забезпечує не лише генерацію електроенергії для власного споживання, але й можливість резервного живлення під час перебоїв у централізованій мережі.

Моделювання режимів роботи станції показало, що прогнозований річний виробіток електроенергії становить 108435 кВт·год. Цей обсяг генерації дозволяє покривати близько 39,23% річних потреб об'єкта в електроенергії, тим самим значно підвищуючи його енергетичну автономність та знижуючи залежність від зовнішніх постачальників. Аналіз погодинних графіків підтвердив високу ефективність системи в літній період, коли пік генерації збігається з піком споживання будівлі.

Техніко-економічне обґрунтування підтвердило високу інвестиційну привабливість проекту. При загальних капітальних витратах у 2243769 грн, враховуючи вартість основного та додаткового обладнання, а також монтажні роботи, простий термін окупності становить 5,03 роки. Розрахунок чистої теперішньої вартості (NPV) за 25-річний період експлуатації при ставці

дисконтування 10% показав значне позитивне значення у 1805725,67 грн, що свідчить про високу рентабельність та доцільність інвестицій.

Таким чином, мета магістерської роботи, яка полягала у підвищенні ефективності електропостачання офісно-виробничої будівлі, була повністю досягнута. Розроблені проєктні рішення є готовою технічною та економічною базою для практичної реалізації на аналогічних комерційних об'єктах.

В якості пропозицій для подальших досліджень рекомендується розглянути можливість інтеграції розробленої системи в концепцію "розумної мережі" (Smart Grid) для оптимізації взаємодії з енергосистемою. Також доцільно провести поглиблений аналіз впливу поступової деградації обладнання на економічні показники в довгостроковій перспективі та дослідити потенціал використання програмних засобів для прогнозування генерації та оптимізації режимів роботи акумуляторних батарей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барило А.А., Бенменні М., Будько В.І. та ін. Відновлювані джерела енергії: монографія / за ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 380 с.
2. Титко Р.А, Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України): навчальний посібник / Титко Р.А, Калініченко В.В – Варшава: OWG, 2010. – 530 с.
3. Германюк М.І. Альтернативні джерела енергії: навчальний посібник / Германюк М.І., Ковальчук І.М. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – 256 с.
4. Герасимов В.І. Використання відновлюваних джерел енергії: навчальний посібник. –Рівне: НУВГП, 2019. – 200 с.
5. Гаєвський О.Ю. Фотоенергетика. Частина І: Сонячна радіація і фотоелектричні модулі: підручник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 150 с.
6. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. – Київ : НТУУ «КПІ». 2012. – 492с.
7. Кузьміна М. М. Розвиток сонячної енергетики в Україні. Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право. 2014. Вип. 29(1). с. 183-186.
8. Artline. Сонячна енергія змінного або постійного струму: розуміння струму вашої системи. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://artline.ua/uk/blogs/solnechnaya-energiya-peremennogo-ili-postoyannogo-toka-ponimanie-toka-vashey-sistemy> (дата звернення: 19.09.2025).
9. Microsoft. Що таке сонячна енергія і як вона працює. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.microsoft.com/uk-ua/sustainability/learn/solar-energy> (дата звернення: 20.09.2025).

10. EcoTech Ukraine. Принцип роботи сонячної електростанції. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ecotech.ua/prynczyp-roboty-sonyachnoyi-elektrostantsiyi-yak-vony-generuyut-energiyu-vid-sonczya/> (дата звернення: 19.09.2025).
11. Huawei FusionSolar. Інтелектуальні рішення для моніторингу сонячних систем. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://solar.huawei.com> (дата звернення: 20.09.2025)
12. Укргідроенерго Звіт ІЕА : до 2025 року понад третина електроенергії світу вироблятиметься з ВДЕ [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/iea-do-2025-roku-ponad-tretyna-elektroenerhiyi-u-sviti-vyroblyatymetsya-z-vde (дата звернення: 21.09.2025)
13. Правила улаштування електроустановок. – Харків : Форт, 2017.
14. Шевченко С.С. Відновлювана енергетика: Навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 320 с.
15. Сорокін С.В., Мацевитий Ю.М. Сонячні енергетичні установки: монографія. – Харків: Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, 2014. – 411 с.
16. Кудря С.О. Нетрадиційні джерела енергії: Навчальний посібник. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 316 с.
17. Кудря С.О. Енергетичні ресурси світу та України. – Київ: ІВЦ «Політехніка», 2013. – 464 с.
18. Андрієнко В.В., Погрібна К.А. Сонячна енергетика: Підручник. – Київ: Кондор, 2019. – 424 с.
19. Huawei FusionSolar Smart PV Solution. White Paper: Residential & C&I Smart PV Solutions. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://solar.huawei.com/en/events/intersolar2023/>. (дата звернення: 23.09.2025)

20. JinkoSolar. Technical Specifications: JKM575N-72HL4-V N-type Tiger Neo Module. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.jinkosolar.com. (дата звернення: 23.09.2025)
21. International Energy Agency (IEA). Renewables 2023. Analysis and forecast to 2028. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/> (дата звернення: 23.09.2025)
22. Прогноз розвитку відновлюваної енергетики в Україні: аналітичний звіт. <https://www.bdo.ua/uk-ua/insights-2/information-materials/2023/analytical-report-on-the-ukrainian-renewable-energy-sector>. – (дата звернення: 20.09.2025)
23. Тарифи на електроенергію для юридичних споживачів. АТ «Київобленерго». – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://koec.com.ua/page?root=23>. (дата звернення: 27.09.2025)
24. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV (зі змінами).
25. Закон України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII (зі змінами).
26. Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу» від 07.02.2017 № 1839-VIII (зі змінами).
27. ДСТУ 8774:2018. Системи енергетичні. Сонячні фотоелектричні. Терміни та визначення понять. – Чинний від 2019-01-01. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
28. ДСТУ EN 61215-1:2021. Наземні фотоелектричні (ФЕ) модулі. Кваліфікація проекту та затвердження типу. Частина 1: Вимоги випробувань (EN 61215-1:2016, IDT). – Чинний від 2021-12-16. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021.
29. ДСТУ Б В.2.5-38:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд (IEC 62305:2006, NEQ). – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008.

ДОДАТКИ

Додаток А

Специфікація на сонячні модулі JKM575N-72HL4-V N-type Tiger Neo Module

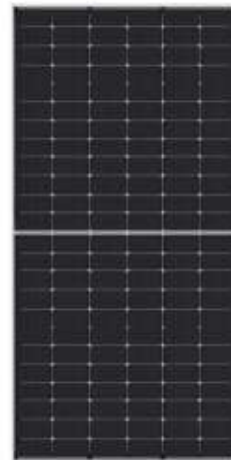
www.jinkosolar.com

**Tiger Neo N-type
72HL4-(V)
555-575 Watt**
MONO-FACIAL MODULE

N-Type

Positive power tolerance of 0~+3%

IEC61215(2016), IEC61730(2016)
ISO9001:2015: Quality Management System
ISO14001:2015: Environment Management System
ISO45001:2018 Occupational health and safety management system



Key Features



SMBB Technology
Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.



Hot 2.0 Technology
The N-type module with Hot 2.0 technology has better reliability and lower LID/LETD.



PID Resistance
Excellent Anti-PID performance guarantee via optimized mass-production process and materials control.



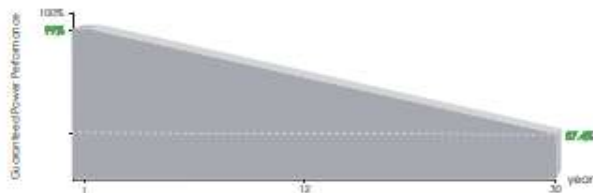
Enhanced Mechanical Load
Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).



Durability Against Extreme Environmental Conditions
High salt mist and ammonia resistance.



LINEAR PERFORMANCE WARRANTY



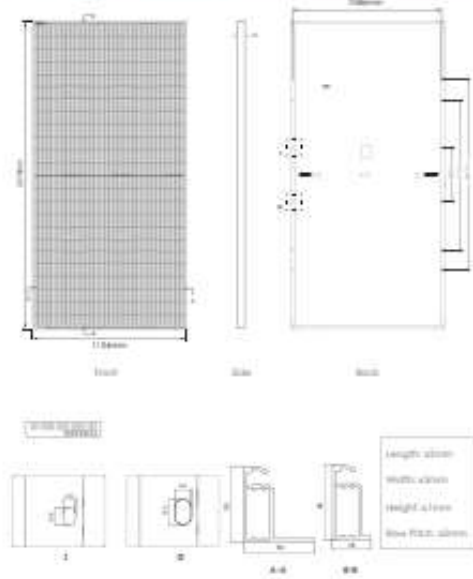
12 Year Product Warranty

30 Year Linear Power Warranty

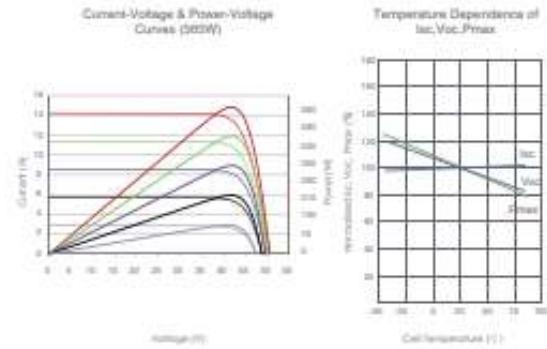
0.40% Annual Degradation Over 30 years

Активация Wind
Чтобы активировать
"Гарантию Power 30 years"

Engineering Drawings



Electrical Performance & Temperature Dependence



Packaging Configuration

(Two panels = One stack)
 2 Stacks/pallet, 42pcs/stack, 84pcs/ 40HQ Container

Mechanical Characteristics

Cell Type	N type Mono-crystalline
No. of cells	144 (6x24)
Dimensions	2278*1134*35mm (89.69*44.65*1.36 inch)
Weight	28kg (61.73 lbs)
Front Glass	3.2mm, Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminum Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV T4C 2mm ² (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM555N-72H4		JKM560N-72H4		JKM565N-72H4		JKM570N-72H4		JKM575N-72H4	
	JKM555N-72H4-V	JKM560N-72H4-V	JKM565N-72H4-V	JKM570N-72H4-V	JKM575N-72H4-V					
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	555Wp	417Wp	560Wp	421Wp	565Wp	425Wp	570Wp	429Wp	575Wp	432Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.64V	39.12V	41.27V	38.25V	41.92V	39.38V	42.07V	39.51V	42.22V	39.60V
Maximum Power Current (Imp)	13.33A	10.67A	13.41A	10.73A	13.48A	10.79A	13.55A	10.85A	13.62A	10.92A
Open-circuit Voltage (Voc)	30.34V	47.83V	30.47V	47.94V	30.60V	48.05V	30.74V	48.16V	30.88V	48.27V
Short-circuit Current (Isc)	14.07A	11.36A	14.15A	11.42A	14.23A	11.49A	14.31A	11.55A	14.39A	11.62A
Module Efficiency STC (%)	21.48%		21.68%		21.87%		22.07%		22.26%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1300VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.30%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.26%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.046%/°C									
Nominal operating cell temperature: (NOCT)	45±2°C									

*STC: ☀️ Irradiance 1000W/m² 🌡️ Cell Temperature 25°C ☁️ AM=1.5
 NOCT: ☀️ Irradiance 800W/m² 🌡️ Ambient Temperature 20°C ☁️ AM=1.5 🌬️ Wind Speed 1m/s

