

**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

проф., д.т.н. /Віктор КАПЛУН/
вчене звання, науковий ступінь підпис

доц., к.т.н. /Євген АНТИПОВ/
вчене звання, науковий ступінь підпис

» » 2025 р.
число місяць рік

» » 2025 р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Техніко-економічні обґрунтування та передпроектні рішення
щодо вибору систем акумулювання статичних джерел»

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

к.т.н доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Сергій УСЕНКО

(ПБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

д.т.н. професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Віктор КАПЛУН

(ПБ)

Виконав

(підпис)

Давид ЛЕЩЕНКО

(ПБ)

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
(назва кафедри)

к.т.н., доц. _____ Євген АНТИПОВ
(підпис)

" _____ " _____ 2024 р.

ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження

З А В Д А Н Н Я

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту

Лещенку Давиду Артуровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Тема магістерської кваліфікаційної роботи техніко-економічне обґрунтування та передпроектні рішення щодо вибору систем акумулювання статичних джерел.

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ 18 ” 11 2024 р. № 2306 "С"

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 2025.11.14.

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи Локальний об'єкт загальним добовим споживанням 307 кВт, та 6 годин автономної роботи.

Перелік питань, які потрібно розробити:

Аналіз існуючих рішень автономного енергозабезпечення

Особливості виконання гібридних інверторів

Економічне обґрунтування локального енергооб'єкту

Розрахунок потужності сонячної електростанції на основі гібридного інвертора

Перелік графічних документів (за потреби) презентація виконана в Microsoft PowerPoint.

Дата видачі завдання “ 18 ” листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Віктор КАПЛУН

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

Давид ЛЕЩЕНКО

РЕФЕРАТ

Сучасний розвиток енергетики характеризується зростанням потреби у стабільному та безперервному електропостачанні, що зумовлює необхідність впровадження ефективних систем акумулювання енергії. Статичні джерела живлення, які широко застосовуються у промисловості, транспорті, телекомунікаціях та об'єктах критичної інфраструктури, потребують надійних рішень для збереження та відновлення енергії. Вибір оптимальної системи накопичення є складним завданням, яке вимагає врахування як технічних, так і ринкових чинників.

Мета роботи полягає у розробці техніко-економічного обґрунтування та формуванні передпроектних рішень щодо вибору систем акумулювання енергії для статичних джерел. Це передбачає аналіз сучасних технологій накопичення, оцінку їх ефективності, надійності, вартості впровадження та експлуатації, а також визначення доцільності застосування у конкретних умовах.

Об'єкт дослідження – системи акумулювання енергії, що інтегруються зі статичними джерелами живлення для забезпечення стабільності та безперервності електропостачання.

Предмет дослідження – технічні параметри, економічні показники та передпроектні рішення, пов'язані з вибором оптимальних систем акумулювання (акумуляторні батареї, суперконденсатори, гібридні системи, гідроакумулюючі та інші технології).

У статті розглядаються ключові критерії вибору систем накопичення: енергоємність, тривалість циклу роботи, коефіцієнт корисної дії, вартість життєвого циклу, екологічні аспекти та перспективи масштабування. Особливу увагу приділено порівнянню традиційних та інноваційних технологій, а також формуванню рекомендацій для їх застосування у різних сферах енергетики та промисловості.

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації процесів проектування енергетичних систем, підвищення їх надійності та економічної ефективності, а також для розробки стратегій розвитку інфраструктури з урахуванням сучасних тенденцій у сфері відновлюваної енергетики та цифровізації.

Ключові слова:

Акумулявання енергії; статичні джерела; техніко-економічне обґрунтування; передпроектні рішення; життєвий цикл.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	9
1.1 Специфіка енергозабезпечення локальних об'єктів.....	9
1.2 Гібридні сонячні енергосистеми.....	9
1.3 Технологічна платформа для впровадження гібридних мікроенергетичних систем.....	13
РОЗДІЛ 2 ОСОБЛИВОСТІ ВИКОНАННЯ ГІБРИДНИХ ІНВЕРТОРІВ.....	16
2.1 Основні поняття про гібридні інвертори.....	16
2.2 Режими роботи гібридних інверторів.....	18
2.3 Компоненти гібридної сонячної системи.....	20
2.4 Приклад технічних характеристик сонячної гібридної системи.....	21
2.5 Базові характеристики сонячних гібридних інверторів.....	23
2.6 Однофазні гібридні інвертори Growatt MIN 3-11.4KTL-ХН.....	26
2.7 Цифрові лічильники електроенергії Growatt SPM/TPM.....	28
2.8 Сучасні підходи до керування енергоефективністю локальних об'єктів..	40
2.9 Особливості функціонування локальних систем електроживлення з багатьма джерелами енергії.....	43
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО ІНВЕРТОРА.....	48
3.1 Розрахунок енергетичних потреб локального об'єкта електроспоживання.	48
3.2 Визначення електричної потужності сонячної електростанції з урахуванням витрат у системі.....	48
3.4 Розрахунок мінімальної електричної ємності АКБ.....	53
3.5 Вибір фотоелектричних панелей.....	54
3.6 Вибір типу та перерізу електричних кабелів.....	55
3.7 Вибір електричних кабелів для мережі постійного струму.....	57
РОЗДІЛ 4 ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	59
4.1 Загальна інформація про ефективність СЕС.....	59
4.2 Орієнтація.....	62
РОЗДІЛ 5 ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЛОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГООБ'ЄКТУ.....	66
5.1. Вступ.....	66
5.2 Альтернативне обладнання локального об'єкту.....	70

5.3 Комплектація на основі SMA Sunny Tripower + Tesla Powerwall 3 + SunPower Maxeon.....	81
5.4 Загальний економічний огляд. Висновки розрахунків.....	88
5.5 Аналіз варіантів обладнання.....	92
РОЗДІЛ 6 ЗАХОДИ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	97
5.1 Загальні правила експлуатації СЕС (сонячної електростанції) для забезпечення безпеки.....	97
5.2 Захист працівника від дії електричного струму.....	99
ВИСНОВКИ.....	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	104

ВСТУП

В роботі розглянуто проблематику вибору систем акумулювання електроенергії на основі статичних джерел та запропоновано інтегровану методику техніко-економічної оцінки. Методика поєднує аналіз технічних параметрів, модель приведених витрат життєвого циклу й критерії експлуатаційної ефективності. Практична частина містить передпроектні рішення для типових енергетичних сценаріїв з оцінкою капіталовкладень, термінів окупності й операційних ризиків.

Актуальність теми обумовлена зростанням питомого навантаження на електромережі, широкою інтеграцією відновлюваних джерел енергії та підвищеними вимогами до якості й надійності електропостачання. Статичні системи акумулювання здатні згладжувати пікові навантаження, забезпечувати резервні потужності і підвищувати гнучкість енергетичних систем, проте різноманіття технологій, відмінності в ресурсі циклів і капіталовитратах ускладнюють вибір оптимального рішення на стадії передпроектного обґрунтування. Метою статті є формування техніко-економічного обґрунтування і розробка передпроектних рішень для вибору оптимальних систем акумулювання з урахуванням технічних вимог, умов експлуатації та річних показників.

У роботі проведено систематизацію сучасних статичних технологій акумулювання з акцентом на ключових технічних параметрах, таких як енергетична щільність та потужність, ефективність перетворення, ресурс циклів і температурна чутливість. Розроблено набір техніко-економічних критеріїв, що включають оцінку приведених витрат життєвого циклу, витрат на технічне обслуговування і заміну компонентів, а також показники надійності і доступності системи. Запропоновано економіко-математичну модель для розрахунку приведених витрат з урахуванням дисконтованих грошових потоків, змінних тарифів на електроенергію і витрат на експлуатацію. Для ранжування

варіантів використано підхід багатокритеріального аналізу з експертною корекцією вагових коефіцієнтів.

Застосована методика дозволяє одержати узагальнену порівняльну оцінку варіантів акумулювання за уніфікованими показниками, що враховують технічні особливості, режим циклічності навантажень і витрати життєвого циклу. Для сценаріїв з інтенсивною циклічністю та частими глибокими розрядами економічно доцільними виявляються рішення з високим ресурсом циклів попри вищі початкові капіталовкладення. У завданнях резервування короточасних піків перевагу набувають системи з високою потужністю щільністю, низькими втратами при коротких циклах і швидкою реакцією. Розроблені передпроектні рішення адаптовано під типові кейси, включаючи комерційні будівлі з піковими навантаженнями, промислові майданчики зі змінним добовим профілем і мікромережі з інтегрованими відновлюваними джерелами; для кожного кейсу наведено оцінку питомих капіталовкладень, очікуваних термінів окупності й основних ризиків.

Запропонований підхід зменшує невизначеність на стадії передпроектного обґрунтування, усуваючи відсутність уніфікованих критеріїв оцінки, а також враховуючи відмінності в ресурсі елементів і режимах експлуатації. Методика залишає можливість адаптації вагових коефіцієнтів під конкретні вимоги замовника і дозволяє інтегрувати макроекономічні параметри, такі як прогноз змін тарифів і витрат на обслуговування. Обмеження дослідження пов'язані з припущеннями щодо стабільності цінових трендів та доступністю репрезентативних даних про деградацію конкретних технологій; подальша робота має передбачати апробацію моделі на реальних проектах з польовими вимірами.

Інтегрована методика техніко-економічної оцінки забезпечує обґрунтований відбір технології акумулювання для різних передпроектних сценаріїв і підкреслює необхідність врахування витрат життєвого циклу, циклічності навантажень і експлуатаційних ризиків при прийнятті рішення.

Передпроектні рішення, запропоновані у статті, створюють основу для зниження капіталовкладень і підвищення надійності проектів впровадження статичних акумуляторних систем.

Рекомендується застосовувати розроблену методику на стадії першочергового відбору варіантів перед деталізацією проектних рішень, проводити польові випробування обраних технологій для уточнення параметрів деградації і витрат на експлуатацію, а також враховувати можливі сценарії зміни тарифів і моделі фінансування при розрахунку окупності.

Ключові слова:

Акумуляування енергії; статичні джерела; техніко-економічне обґрунтування; передпроектні рішення; життєвий цикл.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

1.1 Специфіка енергозабезпечення локальних об'єктів

У сучасних умовах, коли зростає інтерес до екологічно безпечного споживання енергії, як приватні особи, так і бізнес-структури активно шукають способи раціоналізації енергетичних витрат та демонстрації екологічної відповідальності. З поширенням сонячних панелей на дахах будівель у різних країнах, системи генерації електроенергії на основі сонячної енергії стають важливим елементом у формуванні ефективної та екологічно орієнтованої енергетичної інфраструктури.

На сьогоднішньому енергетичному ринку представлено кілька варіантів сонячних установок, які відповідають різним запитам споживачів. Вони відрізняються за рівнем продуктивності, тривалістю експлуатації, вартістю та іншими характеристиками. Основні типи таких систем включають: мережеві (on-grid), автономні (off-grid) та комбіновані — гібридні (hybrid) [1]

1.2 Гібридні сонячні енергосистеми

Гібридні сонячні системи поєднують функціональність мережевих та автономних рішень. Вони одночасно підключені до централізованої електромережі та оснащені акумуляторними блоками для резервного живлення. У випадках, коли мережа працює стабільно, інвертор функціонує як звичайний мережевий пристрій. Надлишкова електроенергія, що залишається після забезпечення поточних потреб, спрямовується як до мережі, так і до акумуляторів.

Збережена енергія використовується в нічний час або при аварійному відключенні електропостачання, тоді як вдень основне навантаження забезпечується безпосередньо від сонячних панелей.

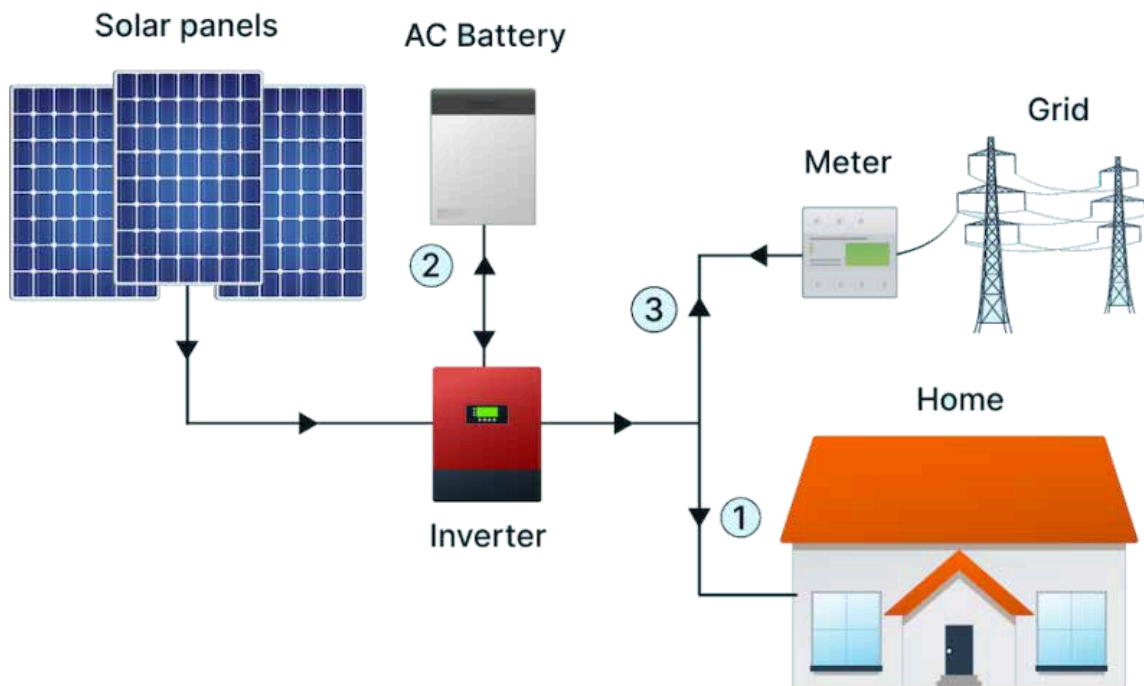


Рис. 1.1 Гібридна сонячна система

Переваги гібридної сонячної системи:

- краще використання відновлюваних ресурсів. Батареї підключаються до спеціально розробленої системи накопичення надлишкової енергії, завдяки чому не відбувається втрат енергії.
- постійне живлення. Це важлива перевага гібридних сонячних систем перед традиційними системами сонячних панелей, оскільки немає перешкод у електропостачанні. Під час перебоїв з електроенергією відбувається вилучення енергії з акумуляторів; решту часу ви отримуєте живлення від сонячних батарей.
- висока ефективність. Генератори гібридної сонячної системи є більш ефективними та екологічними порівняно з традиційними генераторами. Генератори гібридної сонячної системи розроблені для ефективного виробництва електроенергії за будь-яких погодних умов, не витрачаючи зайвого палива.

- управління навантаженням. Гібридні сонячні енергетичні системи накопичують енергію вдень і використовують її вночі. З технологічним прогресом налаштування вносяться автоматично відповідно до вимог до потужності певних пристроїв.
- низька вартість обслуговування. Хоча початкові витрати на встановлення можуть бути вищими, ніж традиційні системи сонячних панелей, у довгостроковій перспективі це виявляється рентабельним

Недоліки гібридної сонячної системи:

- складний процес контролю. В гібридній сонячній системі взаємодіють джерела з різними енергетичними характеристиками, і користувачу потрібні спеціальні електротехнічні знання або знадобитися експерт, щоб керувати цим процесом.
- високі витрати на встановлення. Кілька компонентів, необхідних для встановлення гібридних сонячних систем, збільшують початкові витрати порівняно з іншими типами систем сонячних панелей.
- термін служби батарей. Підключені батареї з часом втрачають ємність, може виникнути потреба технічного обслуговування, щоб не втрачати продуктивність, а також заміни після відмови.
- обмежена кількість сумісних пристроїв. Типи та кількість сумісних пристроїв для гібридних сонячних систем обмежені.

Переваги гібридних сонячних енергосистем

- Рациональне використання енергії з відновлюваних джерел. Завдяки інтеграції акумуляторів із системою збереження надлишкової електроенергії, забезпечується мінімізація втрат та ефективного накопичення енергії.
- Безперервне електропостачання. Однією з ключових переваг гібридних систем є стабільність живлення: у разі перебоїв у мережі живлення

здійснюється з акумуляторів, а в інший час — безпосередньо від сонячних панелей.

- Підвищена продуктивність. Гібридні генератори демонструють кращу ефективність та екологічність порівняно з традиційними аналогами. Вони здатні виробляти електроенергію незалежно від погодних умов, не витрачаючи паливо.
- Гнучке керування навантаженням. Енергія, накопичена протягом дня, використовується в нічний час. Сучасні системи автоматично адаптуються до потреб конкретних пристроїв, оптимізуючі розподіл потужності.
- Економічна доцільність у перспективі. Незважаючи на вищі стартові витрати, гібридні системи потребують мінімального обслуговування, що робить їх вигідними у довгостроковому періоді.

Недоліки гібридних сонячних систем

- Складність управління. Через взаємодію різних джерел енергії, для ефективного контролю системи потрібні спеціальні технічні знання або допомога кваліфікованого фахівця.
- Висока початкова вартість. Велика кількість компонентів, необхідних для монтажу, призводить до значних інвестицій на етапі встановлення порівняно з іншими типами сонячних систем.
- Обмежений ресурс батарей. Акумулятори з часом втрачають свою ємність, що потребує періодичного технічного обслуговування або заміни для збереження ефективності.
- Невелика кількість сумісних пристроїв. Деякі моделі гібридних систем мають обмеження щодо типів обладнання, яке може бути до них підключене.

1.3 Технологічна платформа для впровадження гібридних мікроенергетичних систем

Гібридні мікроенергосистеми являють собою високоефективні комплекси для генерації та споживання електроенергії, які поєднують декілька джерел живлення. Такі системи функціонують незалежно від централізованих електромереж, що робить їх особливо актуальними для енергозабезпечення віддалених або ізольованих територій, де відсутнє стабільне підключення до загальної мережі.

На відміну від традиційних способів виробництва електроенергії, гібридні технології здатні ефективно компенсувати втрати енергії та згладжувати коливання напруги. Їхня перевага полягає в тому, що вони інтегрують два або більше джерела генерації, що дозволяє досягти більшої стабільності та продуктивності в умовах змінного навантаження або нестабільного клімату.

Згідно з аналітичними даними, у 2022 році обсяг світового ринку гібридних енергетичних систем становив приблизно 644 млн доларів США. Очікується, що до 2032 року цей показник зросте до 1225 млн доларів США, демонструючи середньорічний темп приросту на рівні близько 7% [21].

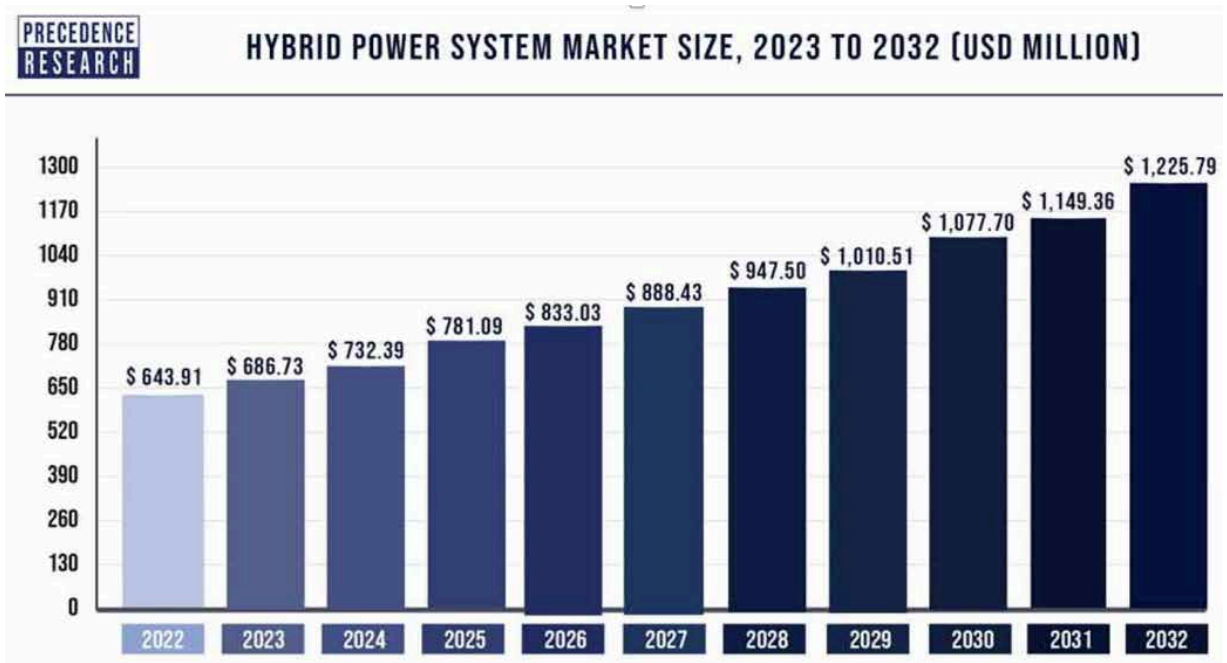


Рис. 1.2 Обсяг світового ринку гібридних енергосистем

Зменшення виробництва палива, збільшення його вартості, зменшення викидів вуглецю, поява нових технологій відновлюваної енергії, велика доступність виробників і різні державні стимули стимулюють попит на гібридні енергетичні рішення. Ці системи виробляють стабільну електроенергію з поєднання сонячних і вітрових джерел енергії, поєднують відновлювані джерела енергії з мережевим електроживленням для адекватного та надійного електропостачання.

Високі початкові витрати та низькі експлуатаційні витрати є характеристиками ринку технологічних гібридних систем живлення. Будівництво цих енергосистем останнім часом зросло через нестабільність мережі та відсутність доступу у віддалених і сільських місцях. Важливим чинником зростання світового ринку гібридної електроенергії є здатність гібридної системи електроенергії виробляти максимальну потужність, використовуючи менше палива.

Висновки до розділу 1:

У даному розділі проведено комплексний аналіз сучасних технологій автономного енергозабезпечення з акцентом на гібридні сонячні системи. Розглянуто специфіку енергозабезпечення локальних об'єктів та визначено основні типи сонячних установок: мережеві, автономні та гібридні. Гібридні системи визначено як найбільш перспективні, оскільки вони поєднують переваги обох попередніх типів, забезпечуючи одночасно розмежану роботу як з електромережею, так і з акумуляторними батареями для резервного живлення.

Проаналізовано світовий ринок гібридних енергосистем, що демонструє динамічне зростання з прогнозованим розширенням обсягів з 644 млн доларів США в 2022 році до 1225 млн доларів США до 2032 року. Виявлено, що основними драйверами розвитку є скорочення виробництва паливних ресурсів, державні стимули та потреба у стабільному електропостачанні в умовах нестабільності електромереж. Дослідження підтверджує важливість впровадження гібридних рішень для локальних об'єктів як засобу підвищення енергетичної автономії та зниження залежності від централізованих мереж.

РОЗДІЛ 2

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОНАННЯ ГІБРИДНИХ ІНВЕРТОРІВ

2.1 Основні поняття про гібридні інвертори.

Гібридні інвертори представляють собою інноваційну сонячну технологію, яка поєднує в собі переваги традиційного сонячного інвертора з можливостями адаптації акумуляторного інвертора в одному пристрої. Цей передовий пристрій пропонує переконливе рішення для власників, які прагнуть запровадити систему сонячної енергії, яка враховує майбутні вдосконалення, такі як включення системи зберігання акумуляторів.

Гібридний інвертор для сонячних панелей, — це пристрій, який поєднує в собі функціональність традиційного сонячного інвертора з додатковими функціями, призначеними для оптимізації використання сонячної енергії та забезпечення більшої гнучкості в управлінні споживанням енергії.

Ключові особливості гібридних інверторів [2]:

- інтеграція виробництва сонячної енергії з системами накопичення енергії. Традиційні сонячні інвертори перетворюють постійний струм (DC), вироблений сонячними панелями, у змінний струм (AC) для негайного використання або експорту в мережу. Навпаки, гібридні інвертори дозволяють зберігати надлишок сонячної енергії в батареях для подальшого використання, таким чином забезпечуючи самоспоживання та енергонезалежність навіть у періоди низької сонячної генерації або відключень електроенергії.
- розширені можливості управління енергією. Гібридні інвертори можуть інтелектуально визначати пріоритети використання сонячної енергії, потужності мережі та накопиченої енергії на основі налаштувань користувача та умов реального часу. Інвертор постійно контролює потік енергії, враховуючи такі фактори, як сонячна генерація, потреба в енергії, рівень заряду акумулятора та доступність мережі. Ця оптимізація

забезпечує ефективне використання енергії, зменшує залежність від мережі та максимізує власне споживання сонячної енергії.

- забезпечення резервного живлення під час відключень мережі. При вимкненні мережі, гібридні інвертори можуть автоматично перемикатися в автономний режим, використовуючи енергію, що зберігається в батареях, для живлення навантажень. Ця функція особливо корисна в регіонах з ненадійною мережевою інфраструктурою або в районах, схильних до частих перебоїв з електропостачанням. Гібридні інвертори пропонують підвищену надійність, забезпечуючи безперервне електропостачання критично важливих навантажень.
- оптимізація часу використання та перенесення навантаження. Гібридні інвертори також можуть сприяти оптимізації часу використання та стратегії перерозподілу навантаження. У деяких регіонах тарифи на електроенергію змінюються протягом дня, а в години пік – вищі. Гібридні інвертори можна запрограмувати на визначення пріоритетів споживання сонячної енергії або накопиченої енергії в ці пікові періоди, тим самим зменшуючи залежність від дорогої електроенергії з мережі. Зміщення навантаження передбачає накопичення надлишку сонячної енергії в періоди низького попиту та використання його в періоди високого попиту, що додатково максимізує економію коштів і незалежність від мережі.
- моніторинг і дистанційне керування. Гібридні інвертори часто оснащені комплексними можливостями моніторингу та керування. За допомогою спеціального програмного забезпечення або мобільних додатків користувачі можуть отримати доступ до даних у режимі реального часу щодо сонячної генерації, споживання енергії, стану акумулятора та продуктивності системи. Ця функція моніторингу дозволяє користувачам відстежувати моделі використання енергії, оптимізувати продуктивність системи та приймати обґрунтовані рішення щодо керування енергією та використання акумулятора. Деякі гібридні інвертори також підтримують

дистанційне керування, що дозволяє користувачам регулювати налаштування, перемикати режими роботи або контролювати стан системи з будь-якого місця, де є підключення до Інтернету.

- можливість розширення та масштабованість. Гібридні інвертори забезпечують гнучкість для майбутнього розширення та масштабованості системи. Користувачі можуть почати з базової установки, яка складається з сонячних панелей і гібридного інвертора, а потім за потреби додати системи зберігання енергії або додаткові сонячні панелі. Модульна природа гібридних інверторів дозволяє легко інтегрувати нові компоненти, що дозволяє оновлювати систему та налаштовувати її відповідно до мінливих вимог до енергії або бюджетних обмежень.
- взаємодія з мережею. У періоди надмірної сонячної генерації, коли батарея повністю заряджена, гібридні інвертори можуть повертати надлишкову енергію назад в мережу. Ці процеси, відомі як «зелений» тариф [3] або чистий облік електроенергії [4], дозволяє користувачам отримувати кредити за енергію, яку вони експортують, компенсуючи свої рахунки за електроенергію та сприяючи більш стійкій енергетичній системі.

2.2 Режими роботи гібридних інверторів

Принцип роботи гібридного інвертора передбачає різні режими роботи в залежності від доступних джерел енергії та вимог електричної системи.

Режими роботи гібридних інверторів [2]:

- режим прив'язки до мережі. У цьому режимі, коли сонячні батареї або інші відновлювані джерела енергії виробляють електроенергію, гібридний інвертор перетворює постійний струм, вироблений цими джерелами, у змінний струм, який можна використовувати побутовими приладами або подавати назад у електричну мережу. Він синхронізує напругу та частоту

змінного струму з мережею для забезпечення стабільного та безпечного з'єднання.

- режим зарядки батареї. Коли надлишок енергії генерується відновлюваними джерелами енергії, але не споживається негайно або не експортується в мережу, гібридний інвертор відводить надлишок енергії для зарядання підключеної системи зберігання акумуляторів з регулюванням процесу зарядання для оптимізації роботи акумуляторів та запобігання перезарядженню.
- режим розрядки батареї. У періоди, коли відновлювані джерела енергії не можуть задовольнити потреби в електроенергії, наприклад вночі або в періоди низького сонячного випромінювання, гібридний інвертор використовує енергію, що зберігається в батареях. Гібридний інвертор перетворює постійний струм від акумуляторів у змінний струм для живлення підключених навантажень, забезпечуючи безперервне електропостачання, навіть коли мережа недоступна.
- режим резервного живлення. У разі відключення електроенергії або збою в електромережі гібридний інвертор може автоматично перейти в резервний режим. Гібридний інвертор відключається від мережі та працює в автономному режимі, використовуючи енергію, накопичену в батареях, для живлення основних навантажень, забезпечуючи безперебійне електропостачання.

Для увімкнення різних режимів роботи, гібридний інвертор включає алгоритми керування та компоненти силової електроніки. Ці компоненти включають перетворювачі постійного струму в змінний струм (DC/AC), контролери відстеження точки максимальної потужності для сонячних панелей (MPPT), контролери заряду акумулятора, схеми синхронізації мережі та захисні пристрої для забезпечення безпечної та ефективної роботи.

Конкретний принцип роботи гібридного інвертора може відрізнитися залежно від виробника та конструкції системи, яка описана в документації виробника

або посібника користувача для отримання детальної інформації про конкретну модель гібридного інвертора.

2.3 Компоненти гібридної сонячної системи

Мінімальний набір для встановлення гібридної сонячної системи включає:

- сонячні панелі поглинають сонячне світло і виробляють електроенергію, кількість їх залежить від енергоспоживання об'єкту та ефективності сонячних панелей
- гібридний інвертор, підключений до сонячних панелей, електромережі і акумуляторних батарей. Інвертор перетворює постійний струм на змінний, інвертує енергію отриману від сонячних панелей в корисну енергію змінного струму, контролює процес розряду і заряджання накопичувальних батарей, взаємодіє з електромережею.
- акумуляторна батарея накопичує надлишок енергії, яку виробляють сонячні панелі. Цю накопичену енергію можна використовувати вночі або в дні, коли сонячної генерації недостатньо.
- лічильник електроенергії, сумісний із вимірюванням мережі, який часто називають чистим лічильником або двостороннім лічильником, здатний вимірювати потужність, що йде в обох напрямках, від мережі до об'єкту та навпаки.
- розподільна коробка змінного струму (Alternating Current Distribution Box - ACDB), основна роль якої полягає в захисті приладів від будь-яких проблем, що виникають у гібридному інверторі. Цей захист складається із компонентів, таких як запобіжник, пристрій захисту від перенапруги та автоматичний вимикач.
- розподільна коробка постійного струму (Direct Current Distribution Box - DCDB) об'єднує багато ліній сонячних панелей у сонячну батарею з двома виходами: негативним і позитивним. Основними компонентами

пристрою є запобіжник, автоматичний вимикач і пристрій захисту від перенапруг.

- електропроводка необхідного перерізу та міцності потрібна для передачі енергії від сонячних панелей, електромережі до різних компонентів, таких як інвертори, батареї, контролери заряду тощо.
- стелажі та кріплення. Для безпечного кріплення і максимального впливу сонячного світла на сонячні панелі на різних поверхнях залежно від нахилу використовуються кріплення і стійки.

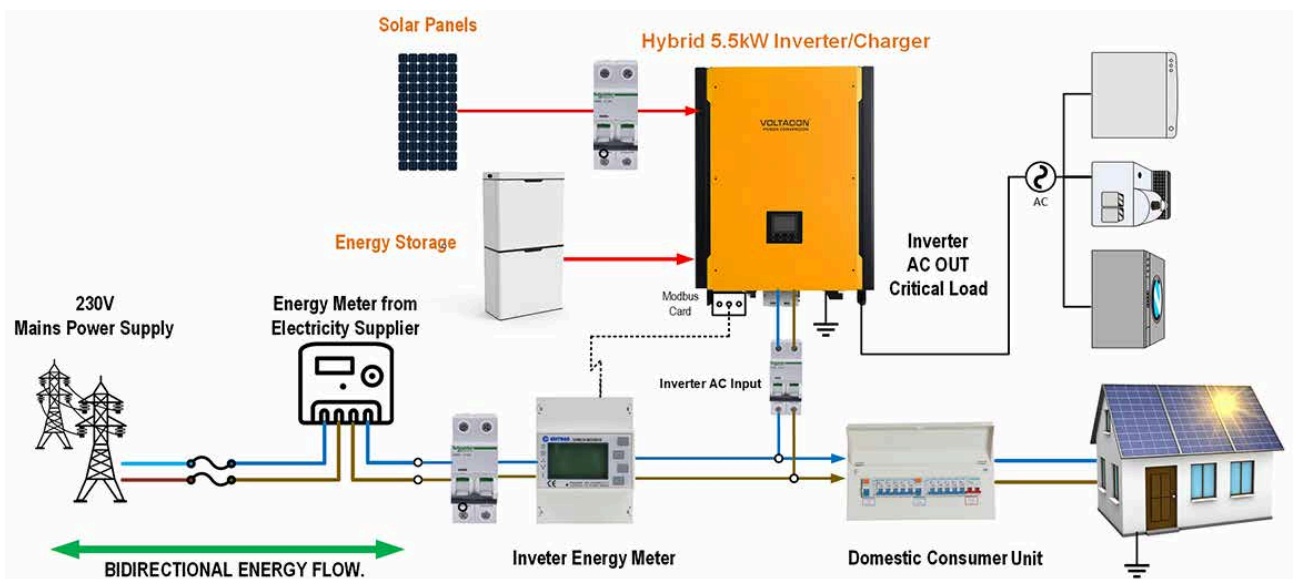


Рис. 2.1 Гібридна фотоелектрична система з інвертором/зарядним пристроєм і накопичувачем енергії – самоспоживання та додатковий експорт до мережі

2.4 Приклад технічних характеристик сонячної гібридної системи

Гібридна сонячна електростанція 10 kW [5] поєднує в собі вискоелефективні сонячні панелі з інтелектуальним гібридним інвертором та сучасними літій-іонними акумуляторами. Вона виробляє електроенергію з сонячного світла та може працювати як автономна система або підключатися до електричної мережі з можливістю додатково генерувати енергію за “зеленим тарифом”.

Характеристики сонячної електростанції 10 кВт

- потужність сонячних панелей – 9,72 кВт;
- потужність інвертора – 8 кВт;
- тип сонячних панелей – монокристалічні;
- вироблення електроенергії за місяць (зима) – до 292 кВт·год;
- вироблення електроенергії за місяць (літо) – до 1492 кВт·год;
- вироблення електроенергії за 8 місяців (з березня по жовтень) – до 9598 кВт·год;
- вироблення електроенергії за 12 місяців – до 10875 кВт·год;
- ємність акумуляторних батарей – 400 А·год, 48 V (19,2 кВт·год).

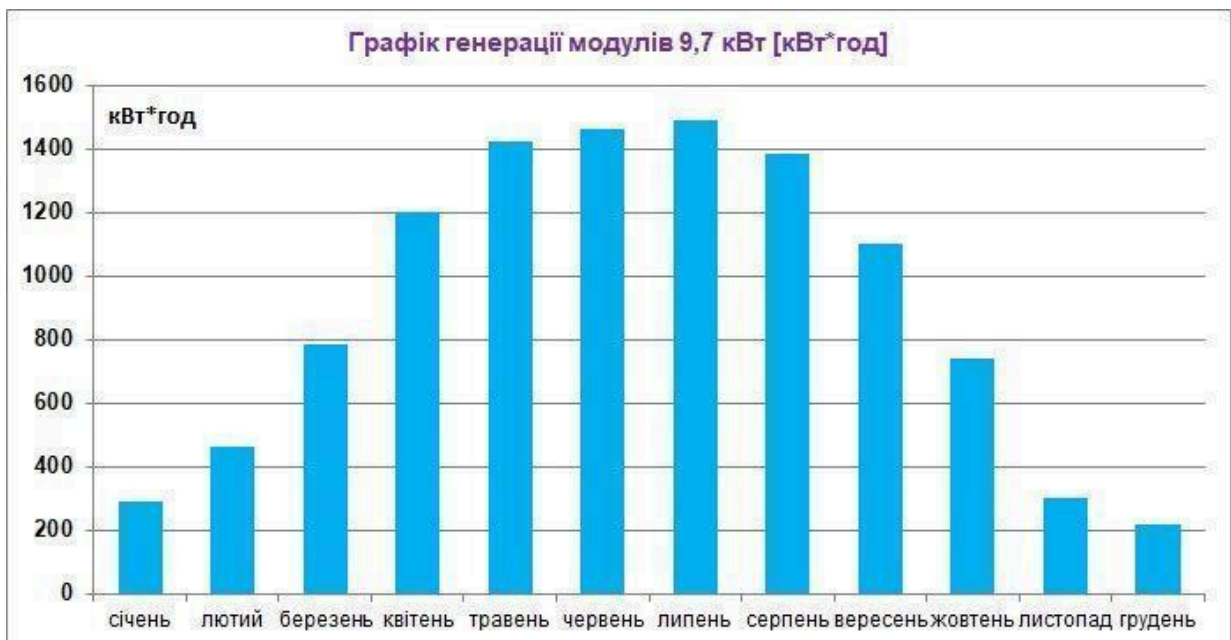


Рис. 2.2 Річний графік генерації енергії сонячною електростанцією 10 кВт

Комплектуючі електростанції:

- сонячна панель JA Solar JAM72S30-540/MR, 540 Вт – 16 шт.
- інвертор гібридний Deye SUN-8K-SG01LP1-EU – 1 шт.
- акумуляторна батарея Challenger LF48-100 (48V, 100A·год) – 4 шт.
- витратні матеріали (кабель, кріплення, електрофурнітура).

2.5 Базові характеристики сонячних гібридних інверторів

Вибір правильного сонячного інвертора для сонячної установки може бути важким рішенням. Необхідно враховувати багато факторів. Найкращий сонячний інвертор може відрізнятися від проекту до проекту залежно від того, яким функціям користувач хоче віддати перевагу.

Список ключових характеристик для порівняння гібридних інверторів [7]:

- ефективність інвертора сонячного інвертора визначає, наскільки добре інвертор може перетворювати електроенергію постійного струму, вироблену сонячними панелями, на електроенергію змінного струму, щоб цю енергію можна було використовувати в навантаженнях і електромережі. У порівнянні з сонячними панелями, сонячні інвертори дуже ефективні. Ефективність інвертора зазвичай становить близько 95-98% , залежно від марки та моделі. Жоден інвертор не є ефективним на 100% , оскільки енергія завжди втрачається під час перетворення змінного струму на постійний. На даний момент Solaredge пропонує рекорд найефективнішого сонячного інвертора з ефективністю 99,2%.
- гнучкість розмірів/дизайну. Різні бренди сонячних інверторів пропонують різний асортимент продукції. Від трифазних до однофазних, мережевих, автономних і гібридних інверторних рішень, різних потужностей, причому деякі бренди пропонують більшу гнучкість і масштабованість.
- режим резервного копіювання. Більшість провідних брендів інверторів тепер мають можливість аварійного джерела живлення (eng. EPS - Emergency Power Supply). Це дозволяє споживачеві користуватись електроенергію в разі її відключення. Різні марки гібридних інверторів підтримують навантаження різної потужності під час резервного режиму, деякі системи здатні запропонувати повне резервне копіювання, тоді як деякі інвертори можуть підтримувати лише певну кількість ампер.

- безпека є, мабуть, найважливішим фактором, який слід враховувати при оцінці інвертора. Забезпечення безпеки системи сонячних панелей починається з встановлення високоякісних компонентів. Оскільки сонячні панелі генерують енергію в постійному струмі, це автоматично створює елемент небезпеки для приміщення. Кабелі постійного струму, що проходять від кожної сонячної панелі до інвертора, можуть передавати величезну напругу до 500V і навіть вище. Найгіршим сценарієм для будь-якої сонячної фотоелектричної системи є пожежа. Саме з цієї причини безпека інверторів є такою важливою.

Перелік ключових функцій безпеки сонячного інвертора:

- безпека по постійному струму. Основна проблема інверторів полягає в тому, що постійний струм надходить до інвертора, поки світить сонце. Навіть коли інвертор вимкнений. Це означає, що якщо користувач торкнеться кабелю постійного струму, він може отримати ураження електричним струмом.
- швидке відключення (eng. RSD - rapid shutdown device). Функція автоматичного відключення гарантує, що інвертор автоматично вимикається, і допомагає провідникам розряджатися до безпечної напруги протягом 30 секунд. Ця функція дає змогу службам швидкого реагування, пожежним або операторам, які працюють у разі відключення електроенергії, безпечно працювати з будь-якою підключеною системою. Це вже є обов'язковою функцією в Америці та Європейському Союзі, а також запобігає розряджанню акумулятора.
- дуговий захист. При пошкодженні кабелів, поганому з'єднанні або короткому замиканні в системі може виникнути дуговий розряд. Інвертор із захистом від дугового замикання усуне ризик виникнення пожежі шляхом автоматичного вимкнення інвертора.
- Вбудований моніторинг температури в інверторах і батареях може контролювати та виявляти перегрів і забезпечувати охолодження.

- Вбудований захист від перепадів напруги захищає навантаження.
- модульний моніторинг дозволяє користувачам і інсталяторам контролювати роботу окремих панелей. Будь-які порушення позначаються сповіщенням, що полегшує визначення неполадок у системі та запобігає потенційним ризикам для безпеки.
- швидкість заряду та розряду батарей – це час, необхідний для заряджання або розряджання в амперах. Вища швидкість заряду/розряду означає, що сонячна фотоелектрична система може керувати вищими навантаженнями.
- моніторинг дає змогу користувачам переглядати та контролювати свою сонячну генерацію та використання енергії. Ці дані надають безцінну інформацію кожному клієнту, включно з тим, скільки енергії зберігається в його акумуляторі або експортується в мережу в будь-який момент часу. Платформи моніторингу зазвичай доступні через додаток на смартфоні або веб-браузері і дозволяють реалізувати різноманітні функції управління гібридною сонячною системою.
- гарантія. Різні бренди інверторів пропонують різні гарантійні періоди, деякі з них виключно для сертифікованих установників і зареєстрованих продуктів. Деякі бренди інверторів також надають можливість придбати/продовжити гарантію.

2.6 Однофазні гібридні інвертори Growatt MIN 3-11.4KTL-XH



Рис. 2.3 Зовнішній вигляд гібридного інвертора Growatt MIN 3-11.4KTL-XH

Однофазні гібридні інвертори Growatt [9, 10] доступні в дев'яти потужностях від 3kW до 11.4kW, тож користувач, ймовірно, знайде принаймні один, який відповідає потужності сонячної батареї.

Технічні характеристики гібридних інверторів Growatt MIN 3-11.4KTL-XH

Вхід PV (DC)

Максимальна рекомендована PV потужність (STC) - 6000 Вт ~ 22800Вт

Максимальна напруга холостого ходу (U_{OC}) - 600 В

Повний діапазон напруги - 100 В ~ 500 В

Номінальна напруга MPPT - 360 В

Кількість входів MPPT - 2 ~ 4

Максимальний вхідний струм на MPPT - 16А ~ 13.5А

Максимальний струм короткого замикання (I_{SC}) - 26А ~ 16.9А

Вхід/Вихід АКБ (DC)

Діапазон напруги входу/виходу	- 360 В ~ 550 В
Номинальна напруга DC	- 400V
Постійний струм входу/виходу	- 8.9A ~ 32.5A
Потужність входу/виходу	- 3200 Вт ~ 11700Вт
Технологія акумулятора	- LiFePo4
Вихід змінного струму (AC)	
Номинальна потужність змінного струму	- 3000 Вт ~ 11400 Вт
Максимальна повна потужність змінного струму	- 3200 В·А ~ 11700 В·А
Номинальна напруга змінного струму	- 240 В
Діапазон напруги змінного струму	- 211 В ~ 264 В
Частота мережі змінного струму	- 50/60 Гц
Діапазон частот мережі змінного струму	- 45 Гц ~ 65 Гц
Максимальний вихідний струм	- 12.5А ~ 48А
Максимальний захист від перевантаження по вихідному струму	- 20А ~ 63А
Коефіцієнт потужності	- >0.99
Регульований коефіцієнт потужності	- 0.8 відставання/випередження
Коефіцієнт нелінійних спотворень THDi	- <3%
Вихід змінного струму резервного живлення (AC)	
Номинальна потужність змінного струму	- 3000 Вт ~ 11400 Вт
Максимальна повна потужність змінного струму	- 4700 В·А ~ 18000 В·А
Номинальна напруга змінного струму	- 240 В
Максимальний вихідний струм	- 20А ~ 75А
Коеф. нелінійних спотворень THD	- 2% лінійне, 5% нелінійне навантаження
Ефективність	
Максимальний ККД	- 98% ~ 98,5%
Пристрої захисту	
Захист від зворотної полярності постійного струму	- так
Перемикач постійного струму	- так

Захист від перенапруг постійного струму	- тип II
Контроль опору ізоляції	- так
Захист від перенапруг змінного струму	- тип III
Захист від короткого замикання змінного струму	- так
Моніторинг замикання на землю	- так
Моніторинг мережі	- так
Захист від острівного затінення	- так
Блок моніторингу диференційного струму	- так
Захист від виникнення електричної дуги (AFCI)	- так
Інтерфейси	
RS485	- так
Зв'язок WIFI/4G	- додатково
Гарантія: 10 років років)	- так (дод. на 15 і 20)

2.7 Цифрові лічильники електроенергії Growatt SPM/TPM

Для функції обмеження експорту використовуються цифрові однофазні Growatt SPM або трифазні Growatt TPM лічильники [12].

Growatt TPM призначений для точного вимірювання та моніторингу споживання електроенергії трифазним джерелом живлення, яке зазвичай використовується в комерційних і промислових умовах. Пристрій встановлюється на DIN-рейці і може вимірювати споживання електроенергії до трьох окремих фаз одночасно.

Лічильник має діапазон вимірювань до 100А на фазу і вимірює споживання як активної, так і реактивної потужності. Лічильник розроблений як високоточний, з класом точності 1, що означає, що він може вимірювати споживання електроенергії з точністю до +/- 1%. Лічильник може взаємодіяти з іншими пристроями та системами, такими як сонячні інвертори та системи

накопичення енергії, для оптимізації споживання енергії та максимізації ефективності. Лічильник обмінюється даними за допомогою ряду протоколів, включаючи Modbus RTU, RS485 і Ethernet.

Ввімкнення функції обмеження експорту дає нульовий експорт до мережі, якщо дозволено системі експорт певної потужності до мережі, тоді встановлюється значення обмеження експорту потужності.

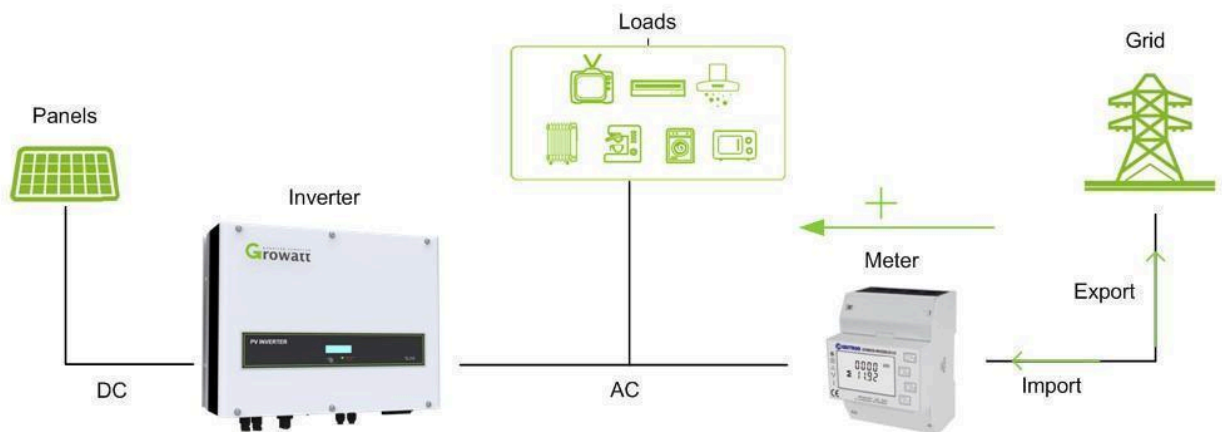


Рис. 2.4 Схема електрична принципова обмеження експорту потужності Growatt

Варіанти високовольтних гібридних систем

Високовольтні архітектури акумуляторних підсистем охоплюють різні підходи, кожен з яких вирішує конкретні інженерні й експлуатаційні завдання. Централізовані батарейні шафи формують один або кілька HV-стеків шляхом послідовного з'єднання великої кількості модулів для отримання номінальної напруги в сотні вольт, що знижує струми і спрощує кабельну інфраструктуру, але вимагає високого ступеня контролю над балансуванням і надійністю кожного модуля. Альтернативно застосовують модульні стеки з локальними BMS і проміжними DC/DC-конверторами, що забезпечує кращу масштабованість, резервування і можливість комбінування різних типів елементів, але підвищує кількість перетворень і ускладнює систему керування. Третій підхід передбачає гібридні конфігурації, в яких низьковольтні підсистеми використовуються для побутових або критичних резервних навантажень, тоді як централізований HV-пакет забезпечує пікові віддачі та пряме підключення до HV-інверторів, що дає гнучкість, але потребує складного багаторівневого BMS і координації між підсистемами. Вибір архітектури визначається критеріями енергетичної щільності, допустимих струмових навантажень проводки, кількості ступенів перетворення енергії, вимогами до масштабованості і загальної вартості життєвого циклу.

Технічні компоненти і вимоги

Підбір хімічних елементів є ключовим інженерним рішенням для HV-систем. Літій-залізо-фосфатні елементи забезпечують підвищену термічну стабільність, тривалий ресурс циклів і прогнозовану деградацію, що робить їх пріоритетними для великих стаціонарних HV-проектів, тоді як NMC або NCA забезпечують вищу енергетичну щільність за рахунок підвищених вимог до терморегулювання і BMS. Ефективна система теплового менеджменту, яка може бути як пасивною, так і активною, необхідна для усунення локальних градієнтів температури і запобігання термічним аномаліям у стосах модулів. BMS для HV-стеків повинна реалізовувати багаторівневу архітектуру з локальними контролерами на модульному рівні і централізованим контролером стека для

моніторингу напруги, струму і температури, виконання пасивного або активного балансування, захистів від перенапруги і заниження, а також для діагностики деградації і передачі телеметрії до інвертора і EMS. Інтеграція батарей з інверторами потребує узгодження номінальних напруг, меж робочих напруг з урахуванням температурних коефіцієнтів і деградації, ліміту зарядних і розрядних струмів, а також механізмів швидкого відключення. Важливою складовою є відповідність системи стандартам електробезпеки та сертифікаціям, наявність апаратних засобів проти підвищених струмів і аварійних станів, ізоляційного моніторингу і засобів безпечного обслуговування.

Операційні режими і стратегії енергоменеджменту

Синергія між інвертором, BMS і системою керування енергією дозволяє реалізувати набір операційних режимів, які підвищують економічну й експлуатаційну ефективність проекту. Режими самоспоживання передбачають пріоритет генерації PV для локальних навантажень з направленням надлишку в батарею, тоді як стратегії пікового згладжування і арбітражу використовують батарею для зниження піків споживання або переміщення енергії у часі з метою отримання економічної вигоди. Режими резервного живлення вимагають від системи швидкого переходу в автономний режим з урахуванням стану заряду, стану здоров'я батареї та поточних температурних умов. Координовані алгоритми управління повинні адаптуватися до параметрів SoC, SoH, прогнозу генерації і профілю навантаження, забезпечуючи при цьому безпечні межі експлуатації батарей і підтримання заданих цілей ефективності.

Опис гібридного інвертора DeyeSun HP

DeyeSun HP є трифазним гібридним інвертором, розробленим для інтеграції масивів PV, високовольтних батарей і мережі з метою управління потоками енергії між джерелами і навантаженнями. Інвертор підтримує пряме підключення HV-стеків з номінальними напругами, характерними для

централізованих батарейних шаф, і реалізує протоколи двосторонньої комунікації з BMS для координованого управління зарядом і захистами. Вхідні PV-канали з широким діапазоном робочих напруг і кількома MPPT дозволяють оптимізувати продукцію сонячних панелей і зменшити кількість окремих входів для великих масивів. Модельна лінійка DeyeSun HP охоплює потужності від комерційних рівнів до більших промислових конфігурацій, забезпечуючи можливість паралельного з'єднання декількох інверторів для досягнення необхідної системної потужності і резервування. Вбудовані функції енергоменеджменту включають профілі пріоритетів генерації і збереження енергії, конфігуровані обмеження на експорт в мережу і часові розклади для реалізації політик експлуатації. Система захистів інвертора охоплює апаратні і програмні механізми проти перенапруги, зниження напруги, перевантажень, температурних аномалій та порушень ізоляції, а також передбачає можливості віддаленого моніторингу і оновлення програмного забезпечення через стандартні інтерфейси зв'язку. Практичні аспекти інтеграції з DeyeSun HP включають ретельне узгодження меж напруг і токів з BMS батарей, забезпечення адекватного охолодження інвертора і його компонентів, і планування операційного обслуговування з періодичною перевіркою телеметрії і захисних пристроїв.



Рис 2.5 Зовнішній вигляд гібридного інвертора Deye.

Архітектура функцій і основні можливості

Інвертор реалізований як модульний активний пристрій із трьома фазами виходу, багатоканальною MPPT-частиною для PV-входів і вбудованою логікою управління батареєю. Основні робочі режими включають: нормальну мережеву роботу з експортом/імпортом, пріоритет PV → Load, заряд батареї за надлишком PV, розряд для підтримки навантаження або згладжування піків, а також автоматичний перехід в автономний (backup) режим при відключенні мережі. Координація з BMS виконується через протоколи зв'язку для забезпечення безпечних меж заряд-розряду, контролю SoC та швидкого аварійного відключення.

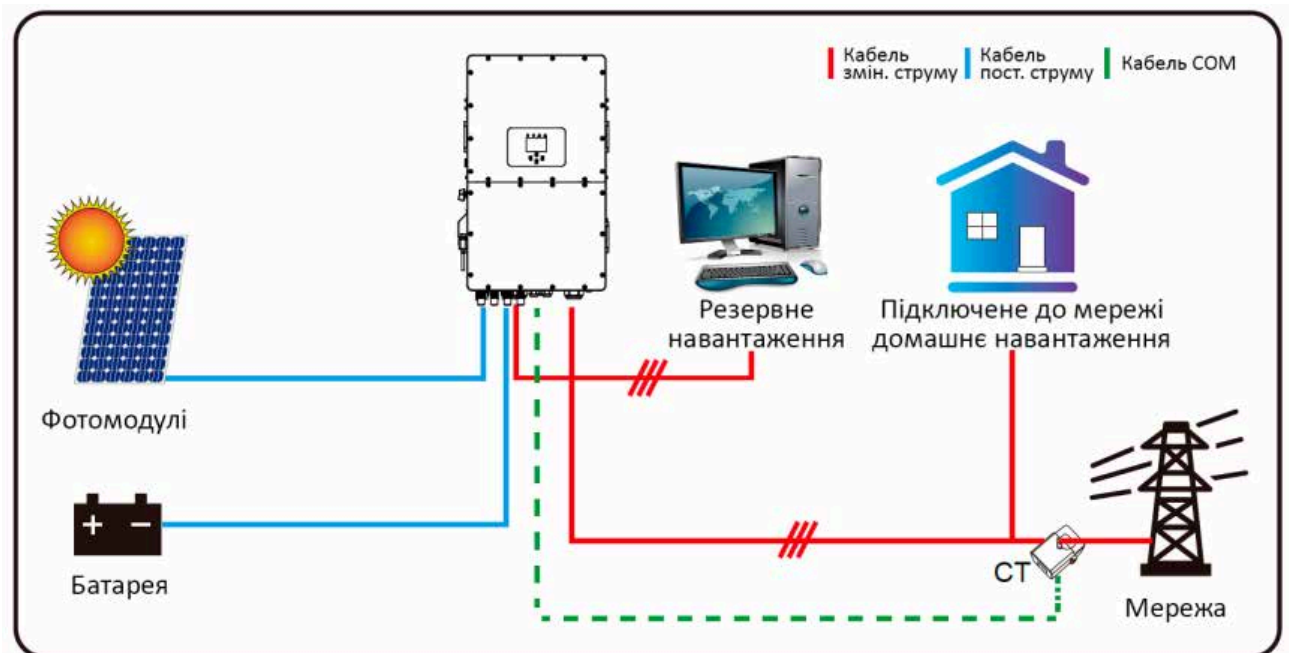
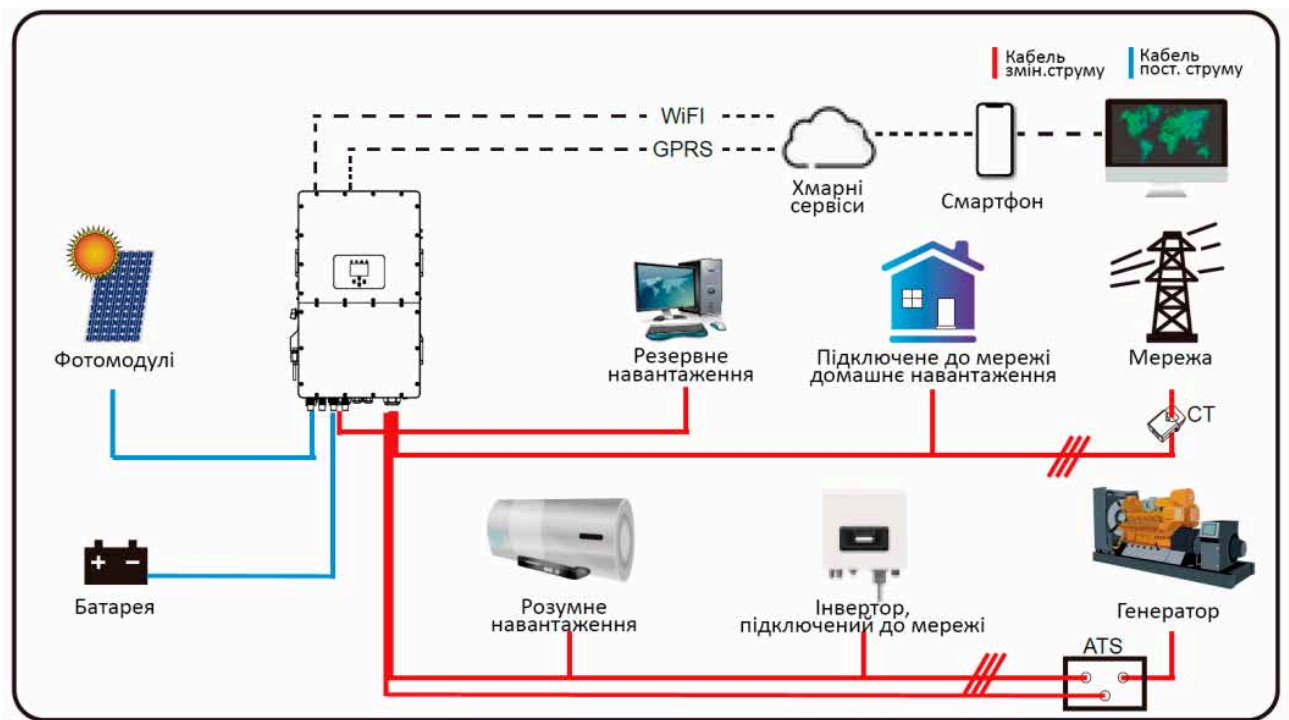


Рис 2.6 Варіанти підключення системи на основі гібридного інвертора
Технічні параметри (структурний опис)

Потужність і робочі напруги. DeyeSun HP 30K призначений для номінальної вихідної потужності близько 30 кВт у трифазній конфігурації з можливістю паралельного з'єднання декількох інверторів для масштабування потужності та створення резервованих систем. Вхідна частина PV має широкую зону робочих напруг і кілька MPPT-каналів, що дає змогу оптимально

підключити великі PV-масиви та зменшити кількість окремих входів. Інвертор підтримує високовольтні батареї з робочими діапазонами напруг, притаманними централізованим стековим рішенням; у практичних інсталяціях це дозволяє підключати BMS-керовані батарейні шафи з номінальними напругами у сотнях вольт.

ККД і робочі характеристики. Конструкція інвертора орієнтована на високу ефективність перетворення при одночасній роботі PV і батареї; заявлені пікові значення ККД інвертора в типових модифікаціях підходять для комерційного класу пристроїв (високі значення ККД при частотах навантаження поблизу номіналу). MPPT-алгоритми забезпечують відстеження максимуму потужності для кожного треку, що підвищує енергетичну віддачу системи в змінних умовах освітленості.

Контроль батареї та інтеграція з BMS. DeyeSun HP 30K передбачає двосторонній обмін даними з зовнішніми BMS через промислові протоколи (Modbus по RS-485/Ethernet або інші відкриті протоколи залежно від комплектації). Завдяки цьому можлива синхронізація параметрів: верхні та нижні пороги напруги, обмеження зарядного і розрядного струму, контроль температури та інші захисні профілі. Інвертор реалізує алгоритми обмеження пускових струмів і захисту при аварійних умовах.

Захисти та безпека. Пристрій оснащується апаратними і програмними захистами: захистом від зворотної полярності, захистом від перенапруги та заниження, струмовими обмеженнями, температурними відключеннями, ізоляційним моніторингом і функціями швидкого розмикання ланцюга при аваріях. Крім того, конструкція передбачає засоби для сервісного обслуговування — розрядні кола, запобіжники та контактори для безпечного відключення HV-ланцюгів під час технічних робіт.

Комунікації та моніторинг. Інвертор постачається з інтегрованими інтерфейсами для локального та віддаленого моніторингу: RS-485 (Modbus), Ethernet і опціонально Wi-Fi. Це дозволяє інтегрувати інвертор до SCADA або

EMS, проводити логування продуктивності, оновлення ПЗ й дистанційну діагностику.

Механіка та умови експлуатації. Корпусні варіанти можуть мати підвищений ступінь захисту (включаючи IP65 у певних виконаннях) для вуличного монтажу. Продумана система охолодження (пасивна або активна, залежно від модифікації) забезпечує теплове управління під навантаженням, що критично для довготривалої надійності в промисловому середовищі.

Проектні та експлуатаційні обмеження

При застосуванні DeyeSun HP 30K необхідно суворо узгоджувати електричні межі з характеристиками батареї та BMS, враховувати температурні коефіцієнти напруги елементів і довгострокову деградацію батарей. Під час проектування слід передбачити резерв за потужністю інвертора для покриття пускових і тимчасових пікових навантажень, а також забезпечити механізми для запобігання частих циклів глибоких розрядів, що скорочують ресурс батареї. Високовольтні ланцюги вимагають спеціалізованих засобів безпеки при монтажі і обслуговуванні, інструментів для перевірки ізоляції та процедур аварійного відключення.

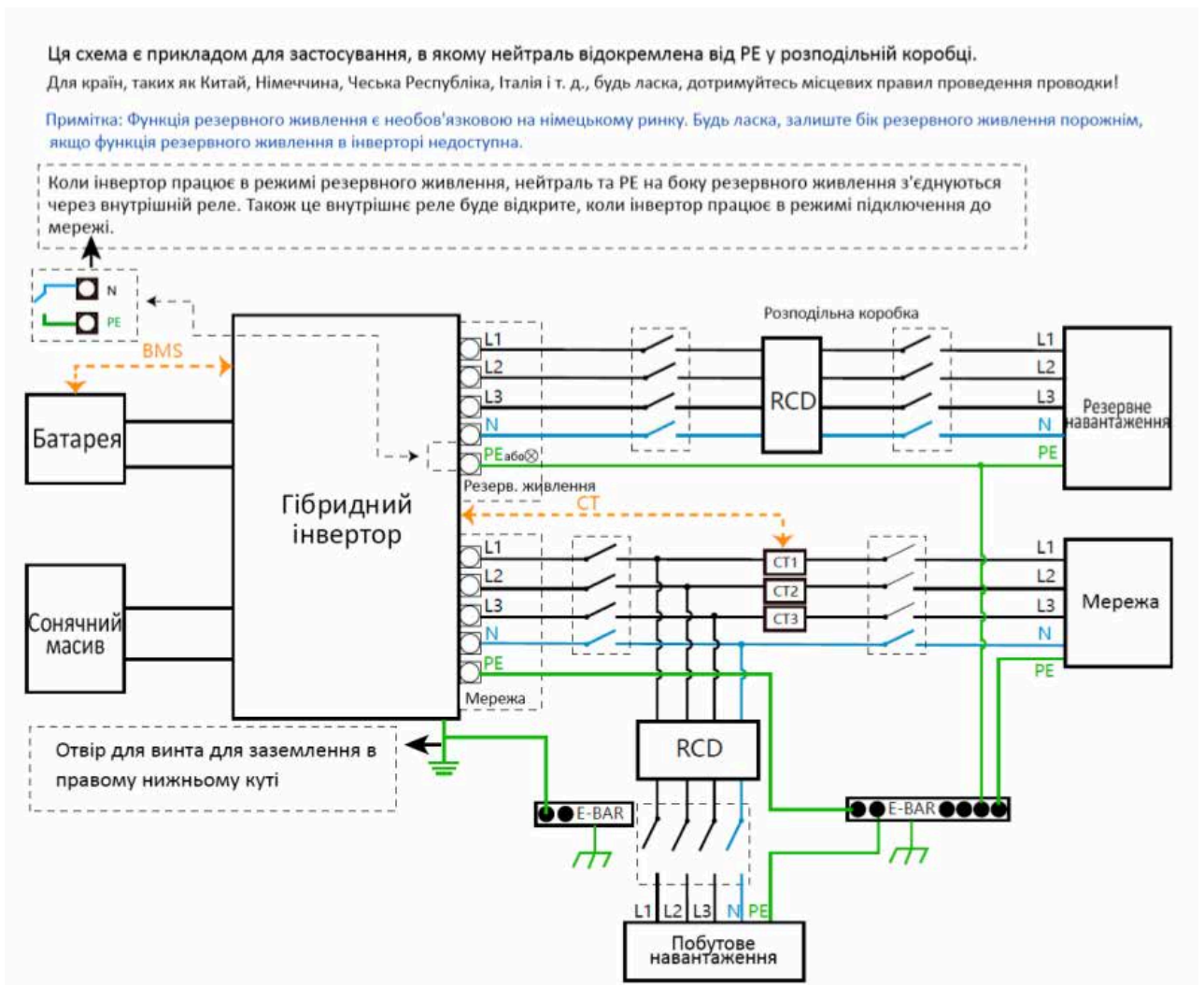


Рис 2.7 Приклад застосування інвертора в схемі, в якій нейтраль відокремлена від PE у розподільній коробці

Аналіз застосування в комерційних системах

Економічна ефективність. У комерційних інсталяціях DeyeSun HP 30K показує конкурентну привабливість завдяки зниженню струмів у кабелях (менші перехресні втрати та вартість кабельної продукції) і можливості прямого підключення HV-батареї, що скорочує кількість проміжних конверторів і пов'язаних з ними втрат. За рахунок багатоканальної MPPT-частини та високого ККД інвертора віддача PV-поля максимально використовується, що підвищує загальну економічну вигоду системи.

Надійність і обслуговування. Сумісність зі стандартними протоколами BMS і наявність віддаленого моніторингу дозволяють реалізувати централізоване управління і прогнозне обслуговування, що підвищує

доступність системи і знижує операційні витрати. Проте робота з HV потребує додаткових процедур і кваліфікації персоналу, що впливає на логістику обслуговування і складність експлуатації.

Гнучкість архітектури. Можливість паралельного з'єднання інверторів дає змогу масштабувати систему під конкретні потреби клієнта, організувати резервування і балансування фаз у трифазних системах. Це робить DeyeSun HP 30K придатним для середніх і великих комерційних проектів, де потрібні як енергетичні сервісні функції, так і надійність.

Ризики та обмеження. Основні ризики пов'язані з необхідністю коректного налаштування взаємодії BMS–інвертор для запобігання конфліктів у логіці заряд/розряд, а також з підвищеними вимогами до сертифікації і відповідності місцевим стандартам електробезпеки. Капітальні витрати на інвертор і сертифіковані HV-компоненти можуть бути вищими в порівнянні з низьковольтними рішеннями; проте економія на кабельній інфраструктурі і підвищена ефективність часто компенсують ці витрати на певних порогах потужності.

Загальна характеристика Huawei SUN2000-30KTL-M3

Huawei SUN2000-30KTL-M3 — трифазний мережевий інвертор комерційного класу номінальною потужністю 30 кВт, призначений для підключення великоформатних PV-полів із кількома MPPT-трекерами, із високим рівнем перетворення енергії та розвиненими можливостями моніторингу й зв'язку для інтеграції в системи управління енергією.

Конструкція входів DC і MPPT

Пристрій оснащений кількома незалежними MPPT-трекерами із широким робочим діапазоном вхідної напруги (типові значення DC-діапазонів у сімействі SUN2000-30/36/40KTL-M3 дозволяють працювати з напругою від сотень вольт до понад 1 кВ залежно від конфігурації), що забезпечує гнучкість проектування PV-масивів і можливість зменшити кількість паралельних ліній і обладнання на даху чи площадці.

Вихідні параметри, потужність і ефективність

Номинальна трифазна вихідна потужність інвертора становить 30 кВт, при цьому максимальна короткочасна активна потужність для пікових навантажень і вимірюється у технічних паспортних графіках; заявлені пікові ККД у родині цих інверторів досягають рівнів близько 98–98,7% у реальних умовах, що робить модель економічно привабливою для комерційних систем, де важлива мінімізація втрат перетворення.

Сумісність із акумуляторами та можливості інтеграції накопичувачів

Хоча базова лінійка SUN2000-30KTL-M3 позиціонується як мережевий інвертор з розвиненими MPPT і інтерфейсами зв'язку, для повноцінної нативної інтеграції високовольтних батарей часто потрібні додаткові рішення або спеціальні моделі/контролери Huawei для роботи з акумуляторними системами; сумісність конкретної батарейної шафи і BMS слід уточнювати на стадії проектування, узгоджуючи протоколи та межі робочих напруг і струмів.

Комунікації, моніторинг і захисти

Інвертор має розвинені інтерфейси зв'язку (Ethernet, RS-485, опціонально Wi-Fi і мобільні модулі для віддаленого моніторингу), підтримує хмарні сервіси Huawei для збору й аналізу даних, а також включає стандартний набір захисних функцій — захист від перенапруги, захист мережевих відхилень, захист по струму і температурі, ізоляційний моніторинг і механізми безпечного відключення для відповідності нормам безпеки та експлуатаційним вимогам комерційних об'єктів.

Механічні характеристики та умови експлуатації

Габарити й маса інвертора робочої серії відповідають промислому класу (прикладні розміри корпусу в документації SUN2000-30/40KTL-M3 близько 640×530×270 мм і вага в межах ~46 кг для деяких виконань), робочий температурний діапазон дозволяє експлуатацію в широкому кліматичному інтервалі

(наприклад, від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$), а для зовнішнього монтажу передбачені вимоги до захисту корпусу й охолодження залежно від умов проекту.

Практичні поради щодо застосування в проектах потужністю $\sim 30\text{ кВт}$

Для проектів з HV-акумуляторами слід заздалегідь перевіряти технічні паспорти обох компонентів (інвертор-батарея), узгоджувати допустиму DC-напругу, механізми відключення, протоколи зв'язку та часові характеристики переходу в автономний режим; при плануванні монтажу потрібно враховувати вимоги до вентиляції, відстаней між обладнанням, захисту від пилу і вологи, а також місцеві норми підключення до мережі і сертифікаційні вимоги для експлуатації комерційних інверторів.

2.8 Сучасні підходи до керування енергоефективністю локальних об'єктів

У широкому контексті методологія проектування систем енергоефективності (СЕЕ) охоплює сукупність теоретично обґрунтованих процедур, які спрямовані на організацію досліджень з метою отримання нових результатів — як загальнозначущих, так і специфічних для конкретного об'єкта або умов його функціонування. Формування такої системи та забезпечення її стабільної роботи передбачає побудову цілісної структури, що відповідає визначеним функціональним завданням, логічній організації та можливим сценаріям реалізації.

Інноваційні рішення в галузі енергетики потребують чіткої організаційної моделі, що, своєю чергою, вимагає впровадження сучасних методологічних підходів до управління та оптимізації енергоспоживання (2–5).



Рис. 2.5 - Структурна схема організації

Поняття «організація» (див. рис. 2.5) розглядається як методологічна конструкція, що включає в себе сукупність характеристик діяльності — таких як принципи, умови, правила та властивості, — а також її логічну побудову, яка охоплює об'єкт, суб'єкт, форму, засоби, методи та результати. Крім того, важливим компонентом є часова структура реалізації діяльності, що охоплює її фази та етапи.

Оцінювання будь-якої системи як складного об'єкта здійснюється на основі методологічних підходів. У контексті комплексних систем енергозабезпечення (КСЕ) це означає необхідність представлення системи у вигляді простору станів і часових множин, у межах яких визначається її поведінка. При цьому важливою є властивість цілісності — система не зводиться до простої суми властивостей її складових. КСЕ характеризуються складною ієрархією взаємозв'язків між елементами, включаючи підсистеми управління та автоматизації, а також активною взаємодією з зовнішнім середовищем.

Можливість трактування КСЕ як великої системної категорії обґрунтовується їх складною функціональною архітектурою, що включає

джерела та споживачів енергії, генераційні модулі, системи управління та обслуговування, зокрема автоматизовані компоненти. Крім того, системи генерації та перетворення енергії належать до класу нелінійних, з розподіленими параметрами, де загальні характеристики не є простою сумою характеристик окремих елементів. Також КСЕ є відкритими системами, що перебувають під впливом вищих рівнів управління та зовнішніх факторів. Це дозволяє застосовувати до них положення теорії великих систем.

Принципи проектування КСЕ, що розглядаються в цій роботі, базуються на системному аналізі функціонування централізованих енергосистем (ЦЕС), потреб локальних споживачів, теоретичних уявленнях про структуру автономних систем, а також на розробці алгоритмів їх роботи. Такий підхід дозволяє декомпонувати загальну проблему на низку підзадач і синтезувати рішення на основі обраних критеріїв, що сприяє досягненню цілісного результату.

Актуальність дослідження зумовлена відсутністю уніфікованих підходів до побудови КСЕ, які б забезпечували інтеграцію різнорідних структурних елементів, включаючи джерела енергії та пристрої її перетворення. Теоретичне обґрунтування принципів проектування КСЕ дозволяє глибше дослідити взаємозв'язки між елементами системи в різних режимах роботи та алгоритмах керування. Існує нагальна потреба у створенні математичних моделей, що дозволяють аналізувати як усталені, так і перехідні процеси в двох основних режимах функціонування КСЕ: при живленні від централізованої мережі (СЦЕП) та від автономних джерел енергії, призначених для локального об'єкта.

Кінцева мета полягає у визначенні оптимального поєднання методів перетворення первинної енергії в електричну, враховуючи фізичні властивості різнорідних елементів джерел енергії та алгоритми їх взаємодії. Це необхідно для досягнення високої надійності, ефективності та загальної якості енергопостачання локального об'єкта.

2.9 Особливості функціонування локальних систем електроживлення з багатьма джерелами енергії

Запропонована конфігурація комплексної системи енергозабезпечення (КСЕ) повинна забезпечувати стабільну роботу при визначеному рівні зовнішнього навантаження, враховуючи обмеження, що зумовлені специфікою її призначення. В залежності від функціонального призначення локальної станції, можуть бути обрані різні критерії оцінки: якість енергопостачання, надійність, енергетична ефективність, економічна доцільність (наприклад, максимальний коефіцієнт корисної дії, мінімальна собівартість одиниці корисної енергії тощо).

Постановка задачі оптимізації передбачає введення системи характеристичних критеріїв — тобто параметрів або цільових функцій, екстремальні значення яких відповідають найкращому стану системи з точки зору споживача. Найбільш доступним методом вирішення таких задач є формування інтегрального критерію, який об'єднує різні типи характеристичних показників. У цьому випадку оптимальними вважаються ті параметри підсистеми, що забезпечують максимальне значення інтегрального критерію.

Однак доцільніше розглядати критерій якості не лише для КСЕ, а для всієї енергетичної системи, частиною якої вона є. Це свідчить про те, що КСЕ не є ізольованою критеріальною системою, і може існувати кілька варіантів її побудови, які узгоджуються із загальною стратегією оптимізації. У таких умовах виникає зона невизначеності, де похибка в оцінці варіантів на основі функціонального аналізу може бути співмірною з похибкою, що виникає через неточність вхідних даних.

Вихід із цієї ситуації можливий шляхом впровадження ієрархічної системи характеристичних критеріїв. З математичної точки зору, це означає формування узагальненого критерію якості, що є результатом поєднання кількох, іноді суперечливих, показників. Окрім складнощів, пов'язаних із вибором релевантних критеріїв, виникає ще одна проблема — узгодження умов

оптимізації на різних рівнях декомпозиції. Ідея декомпозиції передбачає, що оптимізація має здійснюватися на кожному рівні окремо, але при цьому нижчі рівні повинні бути логічно пов'язані з вищими. Ця методологія не завжди дозволяє уникнути конфліктів, тому необхідно шукати нові підходи до вирішення задач багаторівневої оптимізації.

Серед основних річних критеріїв для оцінки ефективності енергетичної установки або системи виділяють загальну вартість (С), яка включає витрати на придбання, монтаж і експлуатацію обладнання, а також питомі витрати на одиницю потужності або енергії. У випадку багатопараметричної оптимізації застосовуються комплексні критерії, доповнені додатковими показниками, що враховують специфіку об'єкта та режимів його роботи.

$$\Theta = k_1 v_1 + k_2 v_2 + k_3 v_3 + \dots$$

де v_1, v_2, v_3 – критерії, які характеризують окремі показники обладнання (вартість, ймовірність відмови Q, показники якості і таке інше), а коефіцієнти значущості k_1, k_2, k_3 визначають рівень впливу окремих критеріїв. Мінімізація Θ забезпечується за рахунок всіх v_i ($i=1,2, \dots$), однак вибір k_i , як правило не є однозначно обґрунтованим і спирається на суб'єктивні фактори. Загалом, всі v_i залежать одне від одного, проте встановлення таких залежностей можливо лише при деяких реалізаціях.

Задача оптимізації КСЕ має багато критеріїв і може являти собою занадто громіздку процедуру. Найоптимальніший підхід – оптимізувати систему за одним критерієм (вартість, надійність, тривалість автономної роботи і т.п.), вважаючи фіксованими інші. Уточнені результати можна отримати шляхом застосування методу компромісів чи послідовних уступок. Основні положення цього методу полягають у фіксації усіх критеріїв, окрім одного, що оптимізується ($v_1 \rightarrow v_{1\min}$). Потім визначається уступка – це допустиме відхилення від $v_{1\min}$ в заданих межах і знаходиться $v_{2\min}$. Далі задається допустиме відхилення від $v_{2\min}$, при якому знаходять $v_{3\min}$ і так далі. Найкращі результати, дасть оптимізація за критерієм Θ з перебором значень v_i .

Зазвичай процес оптимізації комплексної системи енергозабезпечення (КСЕ) здійснюється на двох рівнях: локальному та системному. Локальний рівень охоплює вдосконалення функціонування окремих компонентів, тоді як системний — спрямований на формування оптимальної архітектури всієї енергетичної системи. Ці рівні тісно взаємопов'язані, оскільки корекція параметрів, зокрема вибір конфігурації кабельних трас, може стосуватися як окремих елементів або підсистем, так і всієї структури КСЕ. Такий підхід дозволяє поступово наблизитися до оптимального рішення.

Аналіз наведених даних свідчить, що визначення ключових характеристик системи значною мірою залежить від експертних оцінок і вибору з множини можливих критеріїв, які описують функціональні властивості КСЕ. На основі результатів досліджень можна виокремити набір основних критеріїв, що використовуються для оцінки ефективності системи:

- загальні витрати на створення та експлуатацію КСЕ;
- якість виробленої електроенергії;
- рівень надійності електроживлення;
- питомі витрати на одиницю електроенергії;
- розрахунковий час автономної роботи джерел з заданою ймовірністю;
- показники ефективності функціонування системи.

На основі зазначених критеріїв формується цільова функція, яка використовується для дослідження оптимальної структури та алгоритмів роботи КСЕ.

$$\left(\sum Z_{\Phi} + \sum Z_{Я}^{OEP} + \sum Z_{H}^{OEP} + \sum Z_{Cb}^{OEP} + \sum Z_{Tr}^{OEP} \right) \times K_{\Phi; Я; H; Cб; Tr} \Rightarrow \min$$

де Z_i, Z_i^{OEP} - витрати, пов'язані з реалізацією i -го варіанту КСЕ, визначені

за функціональними характеристиками та обраним технічним рішенням, а також економічні витрати, що опосередковано відображають забезпечення виконання відповідного i -го критерію.

Застосування принципу декомпозиції дозволяє узгодити ключові етапи фізичного та математичного моделювання комплексної системи енергозабезпечення (КСЕ). У цьому контексті четвертий і третій рівні декомпозиції відповідають фазі фізичного моделювання, яка охоплює дослідження процесів енергетичного перетворення. Другий рівень пов'язаний з інтеграцією окремих елементів у функціональні модулі та генератори, а перший — з оцінкою та розподілом ресурсів.

Більш продуктивним підходом є використання імітаційного моделювання, що базується на експертному визначенні стратегії оптимізації. Усі обчислювальні процедури, пов'язані з аналізом наслідків прийнятих рішень, реалізуються за допомогою чисельних моделей. Отримані результати повторно оцінюються експертами, що дозволяє ефективно поєднувати інструменти інформаційних технологій з професійним досвідом. Такий підхід демонструє переваги запропонованої методики побудови математичних моделей КСЕ, яка дає змогу розділити загальну задачу на низку локальних підзадач і знайти відповідь на основне питання шляхом аналізу імітаційних моделей.

Імітаційне моделювання дозволяє дослідити кожен рівень декомпозиції, виявити ключові фактори, що впливають на ефективність функціонування системи. Особливе значення має врахування неповноти вихідної інформації — як щодо властивостей підсистем, так і зовнішніх умов, у яких функціонує система управління споживанням (СУС).

Автономні енергетичні системи належать до класу частково невизначених задач, тобто таких, де присутні випадкові величини з неповністю відомими законами розподілу. Початкову інформацію доцільно класифікувати на зовнішню та внутрішню. Зовнішня інформація охоплює призначення КСЕ з точки зору її взаємодії з централізованою енергосистемою, а також дані про якість і надійність електропостачання та навантаження, які вона обслуговує. Внутрішня інформація стосується поточного стану КСЕ — її структури, параметрів елементів, типів джерел енергії та характеру навантажень. Залежно

від рівня декомпозиції, зміст внутрішньої інформації може змінюватися, але в будь-якому випадку вона повинна враховувати неповноту даних або бути представлена в ймовірній формі.

Принципи побудови оптимальних КСЕ базуються на технологічних, евристичних та математичних положеннях теорії оптимізації. Синтез КСЕ — це процес формування структурних варіантів на основі функціональних характеристик елементів, які забезпечують виконання заданих технічних вимог та алгоритмів роботи. Коли йдеться про пошук найкращої конфігурації та алгоритму функціонування, синтез переходить у фазу оптимізації.

З урахуванням специфіки функціонування системи, особливо джерел енергії, оптимізація КСЕ здійснюється на основі принципів, викладених у джерелах. Основна мета — створення оптимальної структури та алгоритмів роботи, які відповідали б вимогам споживачів і забезпечували надійне та ефективне автономне енергозабезпечення.

Висновки до розділу 2:

У другому розділі детально описано гібридні інвертори як ключову технологію для управління потоками енергії у сучасних енергосистемах. Розглянуто основні функціональні можливості гібридних інверторів: інтеграція виробництва та накопичення енергії, розширене керування енергетичними потоками, забезпечення резервного живлення, оптимізація часу використання енергії та моніторинг у режимі реального часу. Описано чотири основні режими роботи: прив'язка до мережі, зарядка батареї, розрядка батареї та резервне живлення. На прикладах інверторів Growatt, Deye та Huawei продемонстровано різні підходи до конструювання та функціональності. Висновком є те, що сучасні гібридні інвертори мають достатню ефективність (98-98,5%), розвинені системи безпеки та можливості інтеграції з розумними системами управління енергією, що робить їх надійним інструментом для впровадження децентралізованих енергосистем різних масштабів.

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО ІНВЕРТОРА

3.1 Розрахунок енергетичних потреб локального об'єкта електроспоживання

Пікове навантаження, яке може виникнути на об'єкті, становить 22 кВт.

Сукупне добове споживання електроенергії об'єктом (низькоповерховий житловий будинок) дорівнює 307 кВт·год.

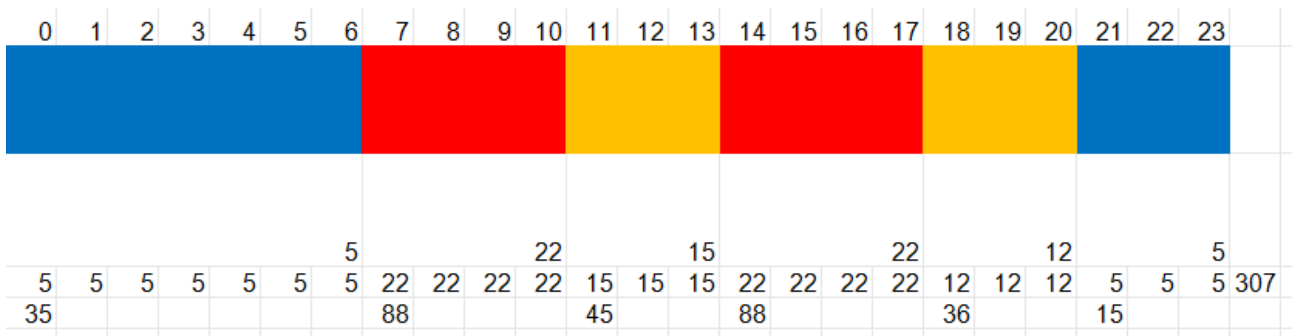


Рис.3.1 Графік добового електроспоживання енергооб'єкта

3.2 Визначення електричної потужності сонячної електростанції з урахуванням витрат у системі

$$P_{\text{заг.витр}} = P_{\text{заг}} \cdot 1,3$$

$$P_{\text{заг.витр}} = 22000 \cdot 1,3 = 28600 \text{ Вт} \quad (3.1)$$

де:

$P_{\text{заг}}$ - загальне електроспоживання у Ватах.

1,3 - втрати енергії у системі.

1. Визначаємо сумарну пікову потужність що потрібна для роботи системи:

$$P_{\text{пik}} = P_{\text{заг.витр}} \div J \quad (3.2)$$

Де: J - коефіцієнт PFG (2,93).

Коефіцієнт генерації панелі **PGF** використовується для розрахунку розміру сонячної фотоелектричної системи. Він відображає середню кількість сонячної енергії, що припадає на 1 м² панелі в залежності від географічного розташування; для країн ЄС зазвичай беруть **2,93**. При проектуванні загальна потужність у **ват-піках (Wp)** визначається як добова потреба в енергії (у ват-годинах), яку мають забезпечити модулі, поділена на **PGF**. Добова потреба в ват-годинах обчислюється як сумарне споживання приладів за добу, помножене на коефіцієнт **1,3**, що враховує системні втрати.

$$P_{\text{пik}} = 28600 \div 2,93 = 9761 \text{ Вт}$$

Кількість сонячних панелей для данної системи:

$$N_{\text{сон.пан}} = P_{\text{пik}} \div W_{\text{пан}} \quad (3.3)$$

Де:

$W_{\text{пан}}$ - потужність однієї сонячної панелі $W_{\text{пан}} (P_{\text{НОСТ}}) = 352 \text{ Вт}$

$$N_{\text{сон.пан}} = 9761 \div 352 = 28 \text{ шт.} \quad (3.4)$$

При проектуванні сонячної електростанції слід обов'язково користуватися технічними паспортами всіх компонентів системи. Сонячні панелі, окрім інших

параметрів, містять характеристики **NOCT** та **STC**, які необхідно враховувати при оцінці їхньої номінальної та реальної продуктивності.

Фотопанелі обов'язково проходять заводські випробування, а отримані показники заносять у технічний паспорт виробу — “solar module datasheet”. Загальні умови перевірки визначаються як **STC** (Standard Test Conditions). **STC** — це стандартні лабораторні умови, що відповідають ідеалізованій роботі панелі. Випробування виконують на заводі або в лабораторії коротким імпульсом тестера. Інсоляція приймається за **1000 Вт/м²**, спектр — **AM1.5**, вітер відсутній, температура повітря **25°C**. Ці параметри імітують ясний весняний або осінній полудень за умови, що сонячні промені падають на модуль під прямим кутом.

Щоб оцінити поведінку панелей у більш реалістичних польових умовах, введено додаткові параметри, зокрема **NOCT** (Normal Operating Cell Temperature — номінальна робоча температура елемента). **NOCT** визначають при інсоляції **800 Вт/м²** і температурі повітря **20°C**; при цьому електричний ланцюг розімкнений, модуль встановлено під кутом **45°** з орієнтацією на південь. Нижчий показник **NOCT** свідчить про кращу теплову поведінку і вищу реальну віддачу модуля. **NOCT** не є експлуатаційною вимогою, але служить важливим критерієм для оцінки якості панелі.

Матеріали та конструкція панелі впливають на її здатність відводити тепло. Підвищення температури елементів приблизно на **15°C** відносно навколишнього повітря вже помітно знижує продуктивність станції, а нагрів понад **45°C** має значний негативний вплив. Вимірювання **NOCT** проводять за умов відкритої задньої поверхні модуля, щоб забезпечити природну вентиляцію і ефективно охолодження повітрям.

3.3 Розрахунок потужності гібридного інвертора.

Інвертор застосовують для отримання вихідної потужності змінного струму; його вхідна потужність має перевищувати сумарну потужність підключених приладів. Інвертор слід підбирати відповідно до потужності, яку він отримуватиме від акумуляторів. Для автономних систем інвертор повинен

витримувати пікові навантаження, тому його номінал зазвичай беруть із запасом — приблизно **25%** більше від загальної потужності приладів. Для обладнання з великими пусковими струмами (двигуни, компресори) рекомендується передбачати інвертор із запасом не менше **в 3 рази** від потужності такого приладу і додавати цей запас до загальної потужності системи, щоб покривати пускові струми під час запуску.

Для системи з піковим споживанням 22000 Вт потрібен інвертор 27500 Вт.

Обираємо інвертор який підходить за всіма параметрами:

Hybrid Inverter SUN-30K-SG01HP3-EU-VM3 [29].

Основні технічні характеристики:

Акумуляторний вхід:

Діапазон вхідних напруг: 160-800 В.

Максимальний струм заряду: 50+50 А.

Максимальний струм розряду: 50+50 А.

Фотоелектричний вхід:

Максимальна вхідна потужність: 39000 Вт.

Максимальна вхідна напруга: 1000 В.

Діапазон вхідних напруг MPPT: 150-850 В.

Максимальний вхідний струм: 36+36+36 А.



Рис 3.2 Hybrid Inverter (SUN-30K-SG01HP3-EU-BM3)

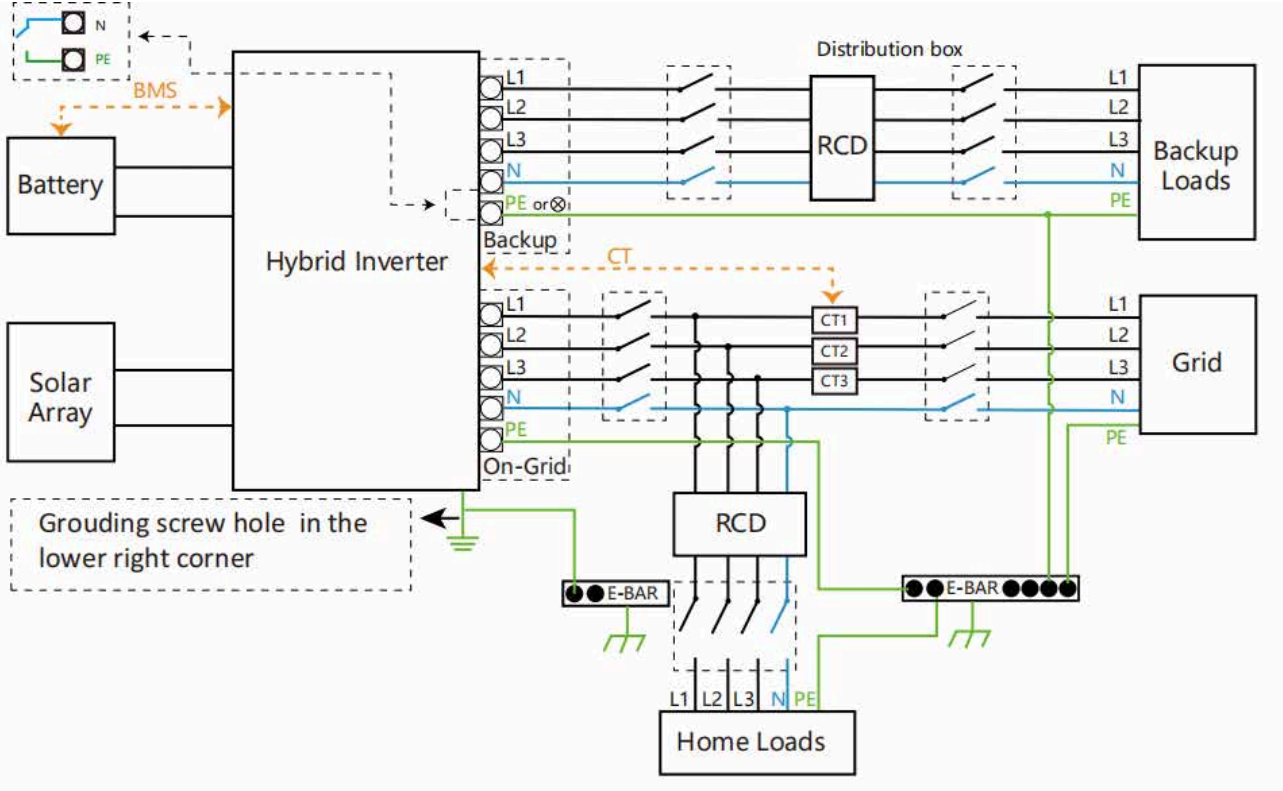


Рис. 3.3 Загальна електрична схема підключення інвертора Hybrid Inverter SUN-30K-SG01HP3-EU-BM3.

3.4 Розрахунок мінімальної електричної ємності АКБ.

$$C_{\text{ак}} = \frac{P_{\text{зар}} \cdot t}{24 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 720} \text{ А/год} \quad (3.5)$$

Де:

t - час автономної роботи АКБ (діб).

0,9 - витрати в АКБ.

0,8 - коефіцієнт DOD для АКБ, характеризує глибину розряду батареї.

720 - напруга акумулятора у Вольтах.

$$C_{\text{ак}} = \frac{307000 \cdot 6}{24 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 480} = 148 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Розрахунок макс. струму АКБ:

$$I_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{зар}}}{U_{\text{акб}} \cdot \text{ККД}_{\text{інв}}} \quad (3.6)$$

$$I_{\text{макс}} = \frac{22000}{720 \cdot 0,9} = 34 \text{ А}$$

Обираємо LiFePO₄ акумулятор Enershare High Voltage 720V 200 Ah який відповідає всім необхідним мінімальним параметрам даної системи.



Рис. 3.4 Система акумуляторів LiFePO4 Enershare High Voltage

3.5 Вибір фотоелектричних панелей:

Максимальний струм що генерують фотоелектричні панелі:

$$I_{\text{макс.пан}} = N_{\text{пан}} \cdot I_{\text{пан}} \quad (3.7)$$

Де:

$N_{\text{пан}}$ - кількість паралельно підключених сонячних панелей.

$I_{\text{пан}}$ - максимальний струм що може видати панель.

$$I_{\text{макс.пан}} = 4 \cdot 11,49 = 45,96 \text{ A}$$

Максимальний струм на який розрахований гібридний інвертор = 108 A,

$$45,96 \text{ A} \leq 108 \text{ A}$$

Максимальна напруга, що видають сонячні панелі:

$$U_{\text{макс}} = U_{\text{хх}} \cdot N_{\text{посл}} = 952,2 \text{ В} \quad (3.8)$$

Де:

$U_{\text{хх}}$ - напруга холостого ходу фотоелектричної панелі.

$N_{\text{посл}}$ - кількість послідовно підключених панелей.

$$U_{\text{макс}} = 47,61 \cdot 20 = 952,2 \text{ В} \quad (3.9)$$

Максимальна потужність генерації системи фотопанелей:

$$P_{\text{макс}} = N_{\text{пан}} \cdot U_{\text{mpp}} \cdot I_{\text{mpp}} \quad (3.10)$$

$$P_{\text{макс}} = N_{\text{пан}} \cdot U_{\text{mpp}} \cdot I_{\text{mpp}} = 29884 \text{ Вт}$$

Використовуємо фотомодуль JAM72S20 440-465/MR [28] його технічні характеристики:

Потужність (у ватах) $W_{\text{пан}} (P_{\text{НОСТ}})$:	352 Вт.
Струм КЗ :	11,49 А.
Напруга точки макс. потужності :	42,4 В.
Напруга розімкнутого електричного кола :	47,61 В.
Струм точки макс. потужності :	8,81 В.
Відхилення номінальної потужності :	0-+ 5 Вт
Температурний коефіцієнт за струмом ($\alpha_{I_{\text{sc}}}$) :	+0,044%/°C
Температурний коефіцієнт за напругою ($\beta_{V_{\text{oc}}}$) :	-0,272%/°C
Температурний коефіцієнт за потужністю ($\gamma_{P_{\text{mp}}}$) :	-0,350%/°C



Рис. 3.5 Сонячна панель JAM72S20 440-465/MR

3.6 Вибір типу та перерізу електричних кабелів.

Вибір перерізу кабелів в сонячній електростанції обирається згідно з таблицею

CIRCUIT TYPE		CURRENT FLOW IN AMPS																							
		10% VOLTAGE DROP Non Critical				3% VOLTAGE DROP Critical																			
		0 to 20 ft.		0 to 6.1 M		0 to 6 ft.		0 to 1.8 M		5A	10A	15A	20A	25A	30A	40A	50A	60A	70A	80A	90A	100A	120A	150A	200A
Standard and Metric Wire Comparison Table	Available Wire Size AWG	Available Wire Size Metric	0 to 20 ft.	0 to 6.1 M	0 to 6 ft.	0 to 1.8 M	16 AWG	16 AWG	16 AWG	16 AWG	16 AWG	14 AWG	14 AWG	12 AWG	10 AWG	10 AWG	8 AWG	6 AWG	6 AWG	6 AWG	4 AWG	4 AWG	2 AWG	1 AWG	210 AWG
	16	1.5	30 ft.	9.1 M	10 ft.	3.0 M	16 AWG	14 AWG	12 AWG	10 AWG	10 AWG	10 AWG	10 AWG	8 AWG	8 AWG	6 AWG	6 AWG	4 AWG	4 AWG	4 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	210 AWG
	14	2.5	50 ft.	15.2 M	15 ft.	4.6 M	14 AWG	12 AWG	10 AWG	10 AWG	10 AWG	10 AWG	8 AWG	8 AWG	6 AWG	6 AWG	4 AWG	4 AWG	4 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	210 AWG
	12	4	65 ft.	19.8 M	20 ft.	6.1 M	14 AWG	10 AWG	10 AWG	10 AWG	8 AWG	8 AWG	6 AWG	6 AWG	6 AWG	4 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	210 AWG
	10	6	80 ft.	24.4 M	25 ft.	7.6 M	12 AWG	10 AWG	8 AWG	8 AWG	6 AWG	6 AWG	6 AWG	6 AWG	4 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG
	8	10	100 ft.	30.5 M	30 ft.	9.1 M	10 AWG	8 AWG	6 AWG	6 AWG	6 AWG	6 AWG	4 AWG	4 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG
	6	16	130 ft.	39.6 M	40 ft.	12.2 M	8 AWG	6 AWG	6 AWG	4 AWG	4 AWG	4 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG	210 AWG	310 AWG	410 AWG
	4	25	165 ft.	50.3 M	50 ft.	15.2 M	10 AWG	6 AWG	4 AWG	4 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG	210 AWG	210 AWG	210 AWG	210 AWG	310 AWG	410 AWG
	2	35	200 ft.	61.0 M	60 ft.	18.3 M	6 AWG	4 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG	210 AWG	310 AWG	310 AWG	310 AWG	310 AWG	310 AWG	410 AWG	410 AWG
	1	50			70 ft.	21.3 M	8 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG	210 AWG	310 AWG	310 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG
	0	70			80 ft.	24.4 M	8 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG	210 AWG	310 AWG	310 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG
	210	95			90 ft.	27.4 M	8 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG	210 AWG	310 AWG	310 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG
	310	120			100 ft.	30.5 M	6 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG	210 AWG	310 AWG	310 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG
410				110 ft.	33.5 M	6 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG	210 AWG	310 AWG	310 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	
				120 ft.	36.6 M	6 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG	210 AWG	310 AWG	310 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	
				130 ft.	39.6 M	6 AWG	4 AWG	2 AWG	2 AWG	1 AWG	1 AWG	0 AWG	0 AWG	210 AWG	210 AWG	310 AWG	310 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	410 AWG	

Although this process uses information from ABYC E-11 to recommend wire size and circuit protection, it may not cover all of the unique characteristics that may exist on a boat. If you have specific questions about your installation please consult an ABYC certified installer.

© Copyright 2017 Blue Sea Systems Inc. All rights reserved. Unauthorized copying or reproduction is a violation of applicable laws.

Рис.3.6 Таблиця для вибору електричних кабелів

Вибір кабелів під акумуляторну батарею

За розрахунками максимальний струм батареї становить 34 А. Загальна необхідна довжина кабелів АКБ — 4,6 м. Округляючи в більшу сторону та орієнтуючись на таблицю допустимих струмів, підбираємо переріз, розрахований на 40 А. В результаті для акумуляторної частини системи обрано кабель перерізом 16 мм².

За розрахунками максимальний струм панелей (Isc) становить 11,5 А. Загальна довжина кабелів для PV-гілок — 30 м. Оскільки до одного входу підключено дві паралельні лінії, сумарний струм подвоюється і дорівнює 23 А. Округляючи в більшу сторону за таблицею допустимих струмів, обираємо переріз, розрахований на 25 А. В результаті для ліній сонячних панелей прийнято кабель перерізом 16 мм².

Розрахунок системи електропостачання на основі гібридного інвертора

Проектні обчислення електропостачання з використанням гібридного інвертора були виконані з орієнтацією на максимально можливу потужність за

заданими параметрами системи. Нижче подано таблицю з розрахунками, що показують мінімально допустиму потужність для цієї конфігурації.

№	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Об'єкт									
2	Пікова потужність, W	Втрати в системі, %	Необхідна потужність, W	Коефіцієнт генерації панелі (PGF)	Загальна пікова потужність, W	Мінімальна кількість панелей	Загальне споживання на добу, W	Годин автономної роботи	Максимальна потужність генерації, W	
3	22000	30	28600	2,93	9761	28	307000	6	10459	
4						Панелей достатньо!			Потужності інвертора достатньо!	
5	Масив сонячних панелей									
6	P_{mpp} (НОСТ), W	U_{mpp} , V	I_{mpp} , A	U_{oc} , V	I_{sc} , A	I_{sc} (SCT), A	Кількість панелей в серії, N_{ser}	Кількість панелей в паралелі, N_{par}	Максимальний струм контролера PV, A	Максимальна напруга PV, V
7	352	42,40	8,81	47,61	9,38	11,49	14	2	23	667
8									Струм PV OK!	Напруга PV OK!
9	Гібридний сонячний інвертор									
10	Коефіцієнт запасу, %	Мінімальна потужність інвертора, W	Максимальний струм інвертора, A	Максимальна на вхідна напруга АКБ, V	Максимальна на вхідна напруга PV, V	Мінімальна напруга MPP, V	Максимальна напруга MPP, V	Максимальний струм MPP, A	Максимальна потужність інвертора, W	
11	25	27500	100	800	1000	150	850	108	30000	
12										
13	Акумуляторна батарея									
14	Глибина розряду (DOD), %	ККД АКБ, %	U_{bat} , V	Максимальний струм АКБ, A	Мінімальна ємність АКБ, Ah					
15	80	90	720	34	148					
16			Напруга	Струм АКБ						

Рис 3.7 Розрахунок мінімальної допустимої потужності електричної системи

3.7 Вибір електричних кабелів для мережі постійного струму.

За розрахунками максимальний струм акумуляторної батареї становить 34 А. Загальна довжина кабелів АКБ — 4,6 м. Округливши в більшу сторону та орієнтуючись на таблицю допустимих струмів, підбираємо переріз, розрахований на 40 А; Обраний кабель має переріз 16 мм².

Вибір кабелів під фотоелектричні панелі:

Відповідно до обчислень, максимальний струм панелей (I_{sc}) становить 9,38 А. Загальна довжина кабелів для PV-гілок — 30 м. Округлюючи в більшу сторону та орієнтуючись на таблицю допустимих струмів, підбираємо переріз, розрахований на 10 А. Отже, для ліній сонячних панелей обрано кабель перерізом 10 мм².

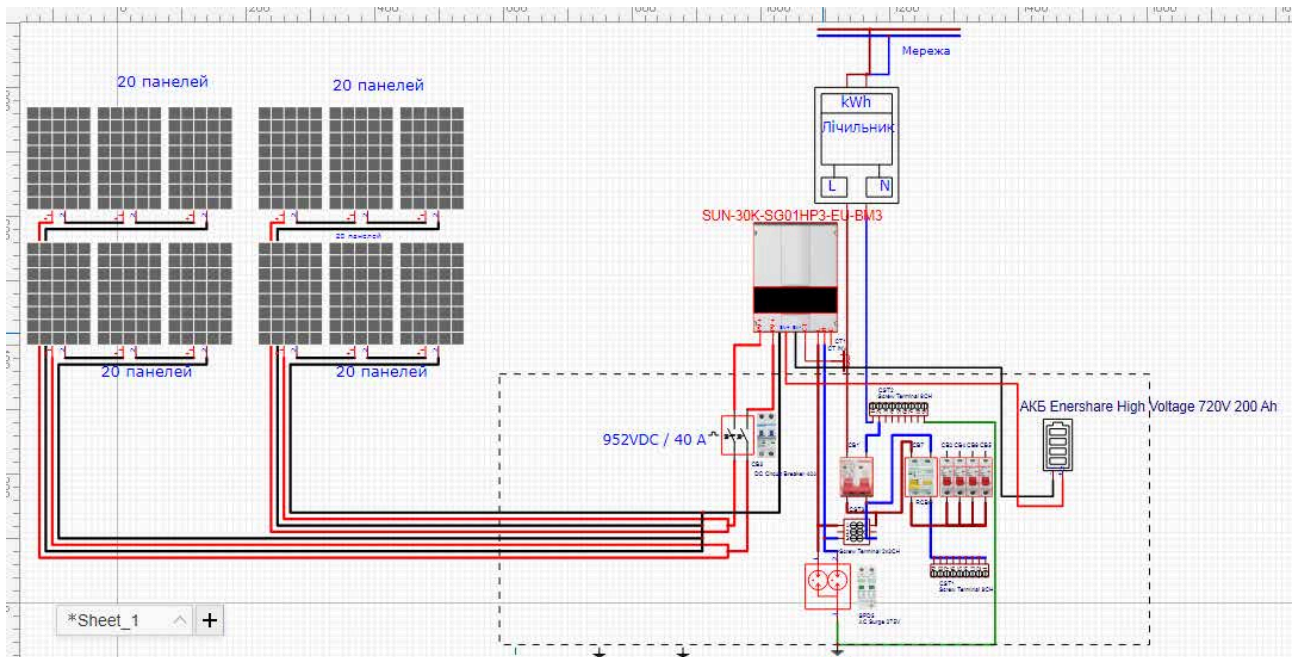


Рис 3.8 Схема підключення системи локального енергооб'єкту

Висновок до розділу 3:

У третьому розділі проведено практичні розрахунки параметрів гібридної сонячної системи для локального об'єкта з добовим споживанням 307 кВт·год та піковим навантаженням 22 кВт з 6-годинною автономністю. Визначено необхідну встановлену потужність сонячних панелей (29,884 кВт) та розраховано мінімальну ємність акумуляторної батареї (148 А·год при номіналі 720 В). Обрано конкретні компоненти системи: гібридний інвертор Deye SUN-30K-SG01HP3-EU-BM3, літій-іонну батарею LiFePO4 Enershare High Voltage 720V 200Ah та сонячні панелі JAM72S20 440-465/MR. Проведено розрахунки перерізів електричних кабелів для мереж постійного та змінного струму. Висновком є те, що запропонована конфігурація технічно адекватна для заданих умов, забезпечує необхідний запас потужності та дозволяє функціонувати в режимах як мережевого живлення, так і автономної роботи.

РОЗДІЛ 4

ОГЛЯД ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

4.1 Загальна інформація про ефективність СЕС.

Зростаючий інтерес до фотоелектричних технологій вимагає не лише вдосконалення самих систем, а й раціонального використання сонячної енергії. На ефективність роботи фотоелектричних установок впливають численні чинники: температурні умови, накопичення пилу, рівень вологості, кут нахилу панелей та сила вітру. Саме тому проводяться глибокі дослідження, спрямовані на узагальнення впливу цих параметрів.

Серед усіх факторів найбільш негативний вплив має висока температура, яка істотно знижує продуктивність системи. Осідання пилу призводить до незначного зменшення напруги холостого ходу, але суттєво знижує струм короткого замикання, що в цілому погіршує ефективність. Вологість також чинить несприятливий вплив на роботу фотоелектричних панелей. Зі збільшенням кута нахилу зменшується здатність панелі вловлювати максимальне сонячне випромінювання, хоча це сприяє меншому накопиченню пилу на її поверхні. Серед усіх згаданих параметрів швидкість вітру має позитивний ефект: вона охолоджує систему, очищає її від пилу та сприяє підвищенню продуктивності.

У глобальному масштабі триває пошук джерел енергії, які були б екологічно безпечними, стабільними, ефективними та надійними. Відновлювані джерела енергії відповідають цим критеріям, хоча їхня генерація значною мірою залежить від природних умов. Одним із стримуючих чинників є низький коефіцієнт корисної дії. Попри це, серед усіх видів відновлюваної енергії саме сонячна енергія викликає дедалі більший інтерес завдяки своїй доступності.

Існує нагальна потреба у високоефективному виробництві електроенергії, що передбачає не лише застосування продуктивного фотоперетворювача, а й обов'язкове врахування чинників, які можуть знижувати ефективність роботи

сонячної фотоелектричної системи. Оскільки така система зазнає впливу багатьох зовнішніх умов — зокрема погодних змін, забруднення атмосфери, рівня вологості тощо — їхнє дослідження є критично важливим для оптимального використання сонячної енергії та продовження експлуатаційного ресурсу фотоелектричних установок.

У зв'язку з цим необхідно здійснити глибокий аналіз і якісне дослідження впливу цих факторів, щоб забезпечити стабільну та ефективну роботу фотоелектричних систем у різних умовах навколишнього середовища.

Рівень генерації електроенергії фотопанелями прямо залежить від кількості сонячного випромінювання, яке поглинається поверхнею панелі, а також від низки зовнішніх чинників, окрім внутрішніх характеристик перетворення [30]. Фотоелектричні станції мають тривалий термін служби, проте постійно піддаються впливу змінних кліматичних умов і різноманітних факторів, що прямо або опосередковано впливають на їхню продуктивність, потужність генерації та довговічність. До ключових параметрів, які визначають ефективність роботи системи, належать температура, рівень вологості, кількість пилу, що накопичується на поверхні панелей, а також швидкість повітряного потоку навколо установки [31].



Рис 4.1 Залежність ефективності сонячної панелі від температури

Одним із ключових чинників, що визначають ефективність роботи сонячних електростанцій (СЕС), є рівень сонячного випромінювання. Чим

інтенсивніше сонячне світло потрапляє на поверхню фотопанелей, тим більший обсяг електроенергії вони здатні генерувати. На цей показник впливають такі фактори, як географічне положення, пора року, час доби та погодні умови.

У регіонах, розташованих ближче до екватора, сонячне випромінювання має вищу інтенсивність, оскільки протягом більшої частини року сонце перебуває високо над горизонтом. Наприклад, держави, що знаходяться в екваторіальній зоні, мають значно більше сонячних днів на рік порівняно з країнами північної частини Європи.

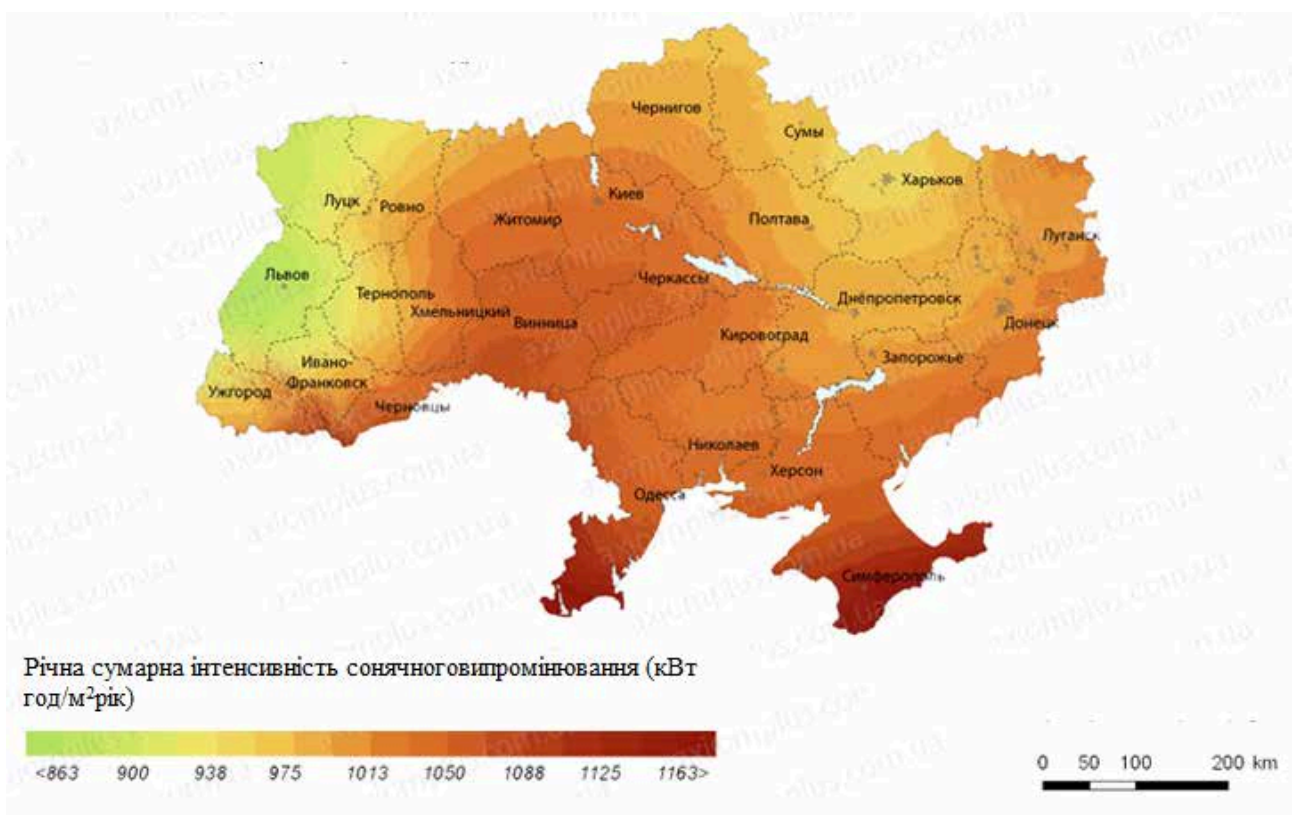


Рис. 4.2 Інтенсивність сонячної радіації в Україні

Сезонні коливання мають значний вплив на ефективність роботи сонячних електростанцій (СЕС). У зимовий період тривалість світлового дня скорочується, а сонце перебуває нижче над горизонтом, що обмежує обсяг доступного сонячного випромінювання. Найвищу продуктивність СЕС демонструють у полуденні години, коли сонце досягає максимальної висоти. У

ранковий та вечірній час інтенсивність випромінювання знижується, що відповідно зменшує генерацію електроенергії.

Забезпечення належної вентиляції та охолодження фотопанелей дозволяє знизити їхню робочу температуру, що позитивно позначається на збереженні високої ефективності системи.

Коректно підібраний кут нахилу та орієнтація панелей здатні істотно підвищити їхню продуктивність. Встановлення панелей має бути здійснене таким чином, щоб вони отримували максимальну кількість сонячного світла протягом усього дня. Оптимальний кут нахилу визначається географічною широтою місця розташування. Загальноприйнятим підходом є встановлення кута, що дорівнює широті, для досягнення найвищого річного рівня генерації енергії.

4.2 Орієнтація

Орієнтація панелей є не менш важливим параметром. У північній півкулі фотопанелі слід спрямовувати на південь, щоб забезпечити максимальне надходження сонячного світла протягом дня. Водночас у південній півкулі оптимальним напрямком є північ.

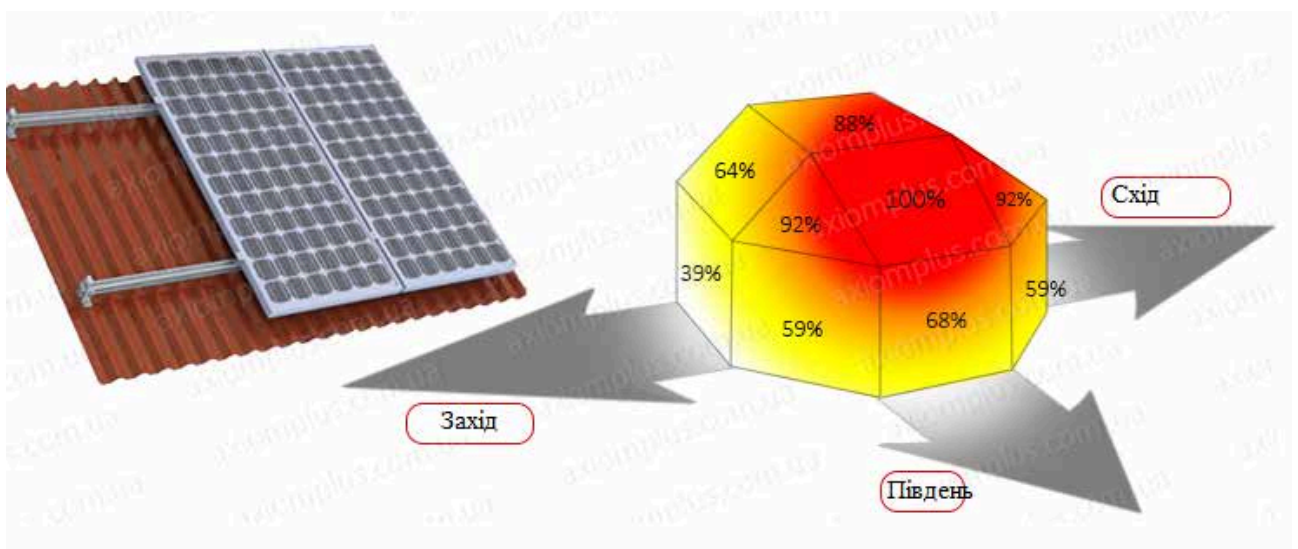


Рис 4.3 Інтенсивність сонячного випромінювання в залежності від орієнтації

Тінь, що виникає від будівель, дерев або інших об'єктів, може істотно зменшити ефективність роботи фотоелектричних (ФЕ) систем. Навіть часткове затінення панелі здатне значно вплинути на загальну продуктивність через явище, відоме як «ефект послідовного з'єднання». Регулярне очищення поверхні панелей сприяє підвищенню їх ефективності. Залежно від рівня забруднення та географічного розташування, може виникати потреба у систематичних перевірках і чистці. Деякі моделі панелей оснащені спеціальними покриттями, які зменшують накопичення забруднень і полегшують процес очищення, що дозволяє скоротити частоту обслуговування.

Існує кілька типів ФЕ панелей: монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові. Монокристалічні модулі характеризуються найвищим рівнем ефективності, однак їхня вартість є вищою порівняно з іншими типами.

Енергетичні втрати, що виникають у кабельних лініях та з'єднаннях, також впливають на загальну продуктивність системи. Застосування якісних кабелів і надійних з'єднувальних елементів дозволяє мінімізувати ці втрати. Вибір кабелів з оптимальним перерізом є критично важливим: надто тонкі провідники збільшують електричний опір, тоді як надмірно товсті — економічно недоцільні. Ненадійні з'єднання можуть спричинити додаткові втрати енергії та підвищити ризик пошкодження системи. Використання сертифікованих компонентів високої якості сприяє стабільній роботі та зниженню втрат.

Таким чином, ефективність сонячних ФЕ систем визначається комплексом чинників: інтенсивністю сонячного випромінювання, температурними умовами, кутом нахилу та орієнтацією панелей, наявністю тіні, рівнем забруднення, якістю обладнання та електричними втратами. Глибоке розуміння та грамотна оптимізація цих параметрів дозволяє значно підвищити продуктивність систем, зробивши їх більш економічно доцільними та надійними джерелами чистої енергії.

Загалом, ФЕ модулі вирізняються високою надійністю, оскільки не мають рухомих частин і не потребують пального. Їхнє первинне широке застосування

було пов'язане з малопотужними системами. Сучасні сонячні електростанції використовують акумуляторні батареї для накопичення виробленої енергії та її подальшого регулювання.

Максимальна потужність СЕС досягається шляхом точного налаштування напруги та струму, щоб вони відповідали точці максимальної потужності. Це необхідно через постійні зміни інсоляції та опору навантаження.

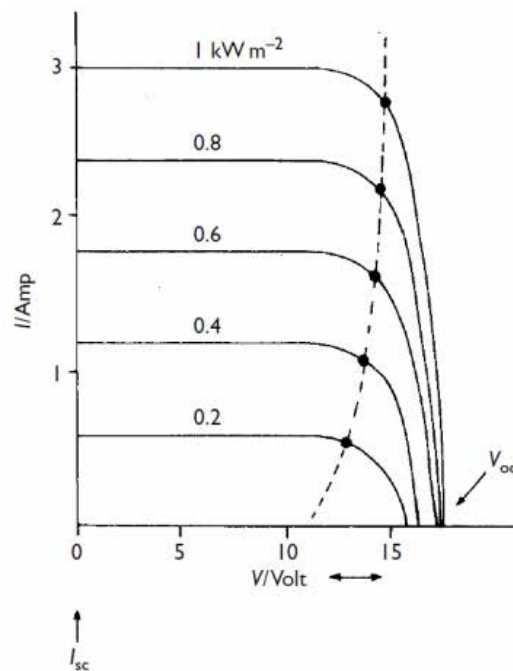


Рис. 4.4 Вольт-амперна характеристика сонячних панелей

Ці процеси відбуваються майже при стабільному рівні напруги — в межах 25% від напруги холостого ходу (V_{oc}), навіть за умови постійної температури елементів. У реальних умовах експлуатації температура робочих компонентів зростає зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання, що призводить до зниження вихідної напруги. У результаті крива максимальної потужності наближається до вертикальної осі. Напруга на клеммах акумуляторної батареї залишається стабільною незалежно від зарядного струму, однак вона поступово підвищується зі збільшенням рівня заряду. Тому вольт-амперна характеристика при нормальному режимі заряджання АКБ наближається до кривої максимальної потужності.

У процесі експлуатації сонячні електростанції (СЕС) є екологічно безпечними: вони не створюють шкідливих викидів і не генерують шум. Водночас їхнє виробництво передбачає використання певних хімічних речовин, які можуть бути токсичними, а також потребує значних енергетичних витрат. У регіонах із помірним кліматом енергетичний період окупності для монокристалічних кремнієвих панелей становить приблизно три-чотири роки.

Хоча гарантійний термін служби таких модулів зазвичай складає близько 20 років, практика показує, що більшість з них функціонує набагато довше, що забезпечує повну окупність інвестицій у фотоелектричні системи.

Висновок до розділу 4:

У четвертому розділі аналізуються ключові технічні фактори, що впливають на продуктивність сонячних електростанцій. Визначено, що температурні умови є найбільш критичним чинником, оскільки підвищена температура істотно зменшує вихідні характеристики панелей. Розглянуто негативний вплив накопичення пилу на поверхнях панелей, яке знижує коефіцієнт корисної дії системи, а також вплив вологості та кута нахилу панелей. Позитивним впливом визначено вітровий обтікання, який охолоджує систему та сприяє очищенню від забруднення. Виявлено, що оптимальна орієнтація панелей прямо залежить від географічного розташування об'єкта та сезонних закономірностей сонячної активності. Висновком є те, що для максимізації ефективності необхідна комплексна оптимізація умов експлуатації з урахуванням місцевих кліматичних чинників та регулярне обслуговування систем.

РОЗДІЛ 5

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЛОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРґООБ'ЄКТУ

5.1. Вступ

Метою даного розділу є проведення детального економічного аналізу локального енергооб'єкту на основі проектної документації, що включає розрахунок вартості всіх компонентів системи, визначення економічної ефективності проекту та обґрунтування доцільності його реалізації. Аналіз виконується з використанням актуальних ринкових цін на обладнання та послуги станом на листопад 2025 року.

Об'єктом дослідження є автономна сонячна електростанція на основі гібридного інвертора з системою акумуляування енергії, призначена для забезпечення електроенергією локального споживача з піковим навантаженням 22 кВт та добовим споживанням 307 кВт·год.

Технічні параметри енергооб'єкту

На основі проектної документації визначено наступні технічні характеристики системи:

Параметри навантаження:

Пікове навантаження: $P_{\text{пік}} = 22 \text{ кВт}$

Добове споживання: $E_{\text{доб}} = 307 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

Річне споживання: $E_{\text{рік}} = 307 \times 365 = 112\,055 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

Основні компоненти системи (Комплектація 1):

Гібридний інвертор:

Модель: SUN-30K-SG01HP3-EU-VM3

Номинальна потужність: 30 кВт

Максимальна вхідна потужність PV: 39 кВт

Діапазон вхідних напруг АКБ: 160-800 В

Максимальний струм заряду/розряду: 50+50 А

Акумуляторна система:

Модель: LiFePO4 Enershare High Voltage

Напруга системи: 720 В

Ємність: 200 А·год

Енергоємність: $E_{\text{АКБ}} = (720 \times 200) / 1000 = 144 \text{ кВт}\cdot\text{год}$

Глибина розряду (DOD): 80%

Корисна ємність: $E_{\text{кор}} = 144 \times 0,8 = 115,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}$

Сонячні панелі:

Модель: JA Solar JAM72S20 440-465/MR

Кількість: 28 шт

Потужність однієї панелі (NOCT): 352 Вт

Потужність однієї панелі (STC): 450 Вт

Загальна потужність масиву (NOCT): $P_{\text{масив}} = 28 \times 352 = 9\,856 \text{ кВт}$

Загальна потужність масиву (STC): $P_{\text{масив,STC}} = 28 \times 450 = 12,6 \text{ кВт}$

Зведений кошторис проекту:

Таблиця 5.1

Вартість компонентів системи

№	Найменування	Од. вим.	К-ть	Ціна, грн	Сума, грн
1	Гібридний інвертор SUN-30K-SG01HP3-EU-ВМЗ	шт	1	185 000	185 000
2	Акумуляторна система	компл.	1	450 000	450 000

	LiFePO4 720V 200Ah				
3	Сонячні панелі JA Solar JAM72S2 0	шт	28	6 500	182 000
4	Кабель силовий для АКБ 16 мм ²	м.п.	5	450	2 250
5	Сонячний кабель 10 мм ²	м.п.	30	380	11 400
6	Системи захисту та автоматик и	компл.	1	25 000	25 000
7	Конектор и MC4	пара	28	280	7 840
8	Система кріплення	компл.	1	42 000	42 000
9	Монтажні роботи	система	1	95 000	95 000
10	Проектув ання та супровід	проект	1	35 000	35 000

	ВСЬОГО (без ПДВ)				1 035 490
	ПДВ (20%)				207 098
	РАЗОМ з ПДВ				1 242 588

Розрахунок ПДВ:

$$\text{ПДВ} = C_{\text{заг без ПДВ}} \times 0,2 = 1\,035\,490 \times 0,2 = 207\,098 \text{ грн}$$

$$C_{\text{заг з ПДВ}} = 1\,035\,490 + 207\,098 = 1\,242\,588 \text{ грн}$$

Розрахунок річних показників ефективності

Річна генерація електроенергії

$$E_{\text{рік}} = E_{\text{доб}} \times 365 = 307 \times 365 = 112\,055 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Річна економія коштів

При середньому тарифі на електроенергію $T = 4,32$ грн/кВт·год:

$$S_{\text{рік}} = E_{\text{рік}} \times T = 112\,055 \times 4,32 = 484\,077,60 \text{ грн}$$

Термін окупності

$$PP = C_{\text{заг}} / S_{\text{рік}} = 1\,242\,588 / 484\,077,60 = 2,57 \text{ років}$$

Округлюючи, простий термін окупності проекту становить 2,6 років або приблизно 31 місяць.

Зведена таблиця річних показників:

Таб. 5.2

Зведена таблиця річних показників

Показник	Значення
Загальна вартість (з ПДВ)	1 242 588 грн
Річна генерація	112 055 кВт·год
Річна економія	484 078 грн
Простий термін окупності	2,6 років
Дисконтований термін окупності ($r=10\%$)	4 роки
NPV (без дисконту, 25 років)	9 758 075 грн
NPV (дисконтований, $r=10\%$, 25 років)	2 767 966 грн
ROI (25 років)	785,3%
IRR	36,83%
Індекс прибутковості (PI)	3,23
LCOE	0,44 грн/кВт·год
Скорочення CO ₂ (рік)	62,97 т
Скорочення CO ₂ (25 років)	1574,37 т
Витрати на ТО (рік)	13 582 грн
Витрати на ТО (25 років)	339 559 грн

5.2 Альтернативне обладнання локального об'єкту

Основні компоненти системи що відповідають всім необхідним технічним характеристикам:

Гібридний інвертор Solax Power X3-Hybrid 30.0-D G4 (Комплектація 2):

Модель: Solax Power X3-Hybrid 30.0-D G4

Номінальна потужність: 30 кВт ват

Вихідна напруга: 230/400 В

Максимальна вхідна потужність PV: 35 кВт

Кількість MPPT: 2

ККД: 97.5%

Акумуляторна система BYD Battery-Box Premium:

Модель: BYD Battery-Box Premium HVS 7.7 x 2 шт

Технологія: LiFePO4

Напруга системи: 480 В (2 блоки)

Ємність на блок: 7.7 кВт·год

Загальна енергоємність: $15.4 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 10 = 154 \text{ кВт}\cdot\text{год}$

Глибина розряду (DOD): 90%

Цикли: 6000+ циклів

Сонячні панелі Canadian Solar HiKu6:

Модель: Canadian Solar HiKu6 CS6W-455MS

Кількість: 28 шт

Потужність однієї панелі (STC): 455 Вт

Потужність однієї панелі (NOCT): 360 Вт

Загальна потужність масиву (STC): $28 \times 455 = 12.74 \text{ кВт}$

Загальна потужність масиву (NOCT): $28 \times 360 = 10.08 \text{ кВт}$

Об'єктом дослідження є автономна сонячна електростанція на основі гібридного інвертора Solax Power X3-Hybrid 30.0-D G4 з системою акумуляування енергії BYD Battery-Box Premium, призначена для забезпечення електроенергією локального споживача з піковим навантаженням 22 кВт та добовим споживанням 307 кВт·год. Це варіант 2 (СТАНДАРТ) із збалансованою конфігурацією європейських брендів середнього сегменту.

Технічні параметри енергооб'єкту

На основі проектної документації визначено наступні технічні характеристики системи:

Параметри навантаження

Пікове навантаження: $P_{\text{пiк}} = 22 \text{ кВт}$

Добове споживання: $E_{\text{доб}} = 307 \text{ кВт}\cdot\text{год}$

Річне споживання: $E_{\text{рiк}} = 307 \times 365 = 112\,055 \text{ кВт}\cdot\text{год}$

Методологія розрахунку вартості проекту

Загальна вартість проекту сонячної електростанції визначається як сума вартостей всіх компонентів:

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{iнв}} + C_{\text{АКБ}} + C_{\text{пан}} + C_{\text{каб}} + C_{\text{авт}} + C_{\text{кон}} + C_{\text{кріп}} + C_{\text{монт}} + C_{\text{проект}}$$

де:

- $C_{\text{iнв}}$ — вартість гібридного інвертора
- $C_{\text{АКБ}}$ — вартість акумуляторної системи
- $C_{\text{пан}}$ — вартість сонячних панелей
- $C_{\text{каб}}$ — вартість кабельної продукції
- $C_{\text{авт}}$ — вартість систем автоматики та захисту
- $C_{\text{кон}}$ — вартість конекторів та з'єднувачів
- $C_{\text{кріп}}$ — вартість системи кріплення
- $C_{\text{монт}}$ — вартість монтажних робіт
- $C_{\text{проект}}$ — вартість проектування та технічного супроводу

Джерела інформації про ціни

Для розрахунку вартості використовувалися актуальні ціни провідних постачальників обладнання для відновлюваної енергетики в Україні та у міжнародних мережах станом на листопад 2025 року. Це комплектація 2, із європейськими брендами середнього сегменту: Solax (інвертор), BYD (акумулятори), Canadian Solar (панелі). Ціни отримані з прайс-листів компаній-постачальників та інтернет-магазинів, що спеціалізуються на постачанні та монтажі сонячних електростанцій.

Детальний розрахунок вартості компонентів

Гібридний інвертор Solax Power X3-Hybrid 30.0-D G4

Обґрунтування вибору: Для системи з піковим навантаженням 22 кВт необхідний інвертор з запасом потужності 25%:

$$P_{\text{інв}} = P_{\text{пік}} \times 1.25 = 22 \times 1.25 = 27.5 \text{ кВт}$$

Solax Power X3-Hybrid 30.0-D G4 потужністю 30 кВт забезпечує необхідний запас та є оптимальним рішенням для європейського ринку з хорошим співвідношенням ціна/якість.

Розрахунок вартості: $C_{\text{інв}} = 168,000$ грн

Акумуляторна система BYD Battery-Box Premium HVS 7.7 x 2

Обґрунтування вибору: Для забезпечення енергетичної незалежності необхідна ємність як мінімум 115.2 кВт·год (глибина розряду 80% від 144 кВт·год):

$$E_{\text{корисна}} = E_{\text{total}} \times \text{DOD} = 154 \times 0.90 = 138.6 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

BYD Battery-Box Premium забезпечує вищу корисну ємність завдяки 90% DOD, що дозволяє максимально утилізувати енергію та продовжити термін служби системи.

Розрахунок вартості: $C_{\text{АКБ}} = 2 \times 77,000 = 154,000$ грн

Сонячні панелі Canadian Solar HiKu6 CS6W-455MS

Обґрунтування вибору: Необхідна потужність масиву розраховується за формулою:

$$P_{\text{масив}} = (P_{\text{пік}} \times 1.3) / 2.93 = (22 \times 1.3) / 2.93 = 9.76 \text{ кВт}$$

$$\text{Кількість панелей: } N = 9.76 \text{ кВт} / 360 \text{ W (НОСТ)} = 27.1 \approx 28$$

панелей

Canadian Solar HiKu6 455W (360W NOCT) – це європейський бренд з відмінною якістю та надійністю.

Розрахунок вартості: $C_{\text{пан}} = 28 \times 6,250 = 175,000$ грн

Зведений кошторис проекту:

Табл. 5.3

Вартість компонентів системи

№	Найменування	Од. вим.	К-ть	Ціна, грн	Сума, грн
1	Гібридний інвертор Solax Power X3-Hybrid 30.0-D G4	шт	1	168 000	168 000
2	Акумуляторна система BYD Battery-Box Premium HVS 7.7 x 2	компл.	2	77 000	154 000
3	Сонячні панелі Canadian Solar HiKu6 CS6W-45 5MS	шт	28	6 250	175 000

4	Кабель силовий для АКБ 16 мм ²	м.п.	5	450	2 250
5	Сонячний кабель 10 мм ² (UV-resistant)	м.п.	30	380	11 400
6	Системи захисту та автоматик и (DC-бокс, автомати, SPD)	компл.	1	23 000	23 000
7	Конектор и MC4 (Комплек тація 3) якiсть)	пара	28	280	7 840
8	Система кріплення (сталь/ал юміній)	компл.	1	38 000	38 000
9	Монтажні роботи (стандарт	система	1	85 000	85 000

	ний монтаж)				
10	Проектув ання та технічний супровід	проект	1	32 000	32 000
	ВСЬОГО (без ПДВ)				696 540
	ПДВ (20%)				139 308
	РАЗОМ з ПДВ				835 848

Розрахунок ПДВ

$$\text{ПДВ} = C_{\text{заг без ПДВ}} \times 0.2 = 696,540 \times 0.2 = 139,308 \text{ грн}$$

$$C_{\text{заг з ПДВ}} = 696,540 + 139,308 = 835,848 \text{ грн}$$

Аналіз структури витрат

Табл. 5.4

Розподіл витрат за категоріями

Категорія	Вартість, грн	Частка, %
Система акумулявання (BYD)	154 000	22.1%
Інверторне обладнання (Solax)	168 000	24.1%
Сонячні панелі (Canadian Solar)	175 000	25.1%

Монтажні конструкції та кріплення	38 000	5.4%
Роботи та супровід	117 000	16.8%
Автоматика та захист	23 000	3.3%
Кабельна продукція	13 650	2.0%
Конектори та з'єднання	7 840	1.1%

Коментар до структури витрат

Сонячні панелі (25.1%) та інвертор (24.1%) займають приблизно однакові частки, що є характерним для якісних систем. Акумуляторна система BYD (22.1%) має меншу частку порівняно з більш дорогими варіантами завдяки використанню 2 модулів по 7.7 кВт·год замість одного великого блока 200Ah. Роботи та супровід (16.8%) складають суттєву частину вартості і включають стандартний монтаж з гарантією та технічне супровід. Інше обладнання (автоматика, кабелі, кріплення) становлять близько 11% вартості.

Розрахунок річних показників ефективності

Річна генерація електроенергії:

$$E_{\text{рік}} = E_{\text{доб}} \times 365 = 307 \times 365 = 112\,055 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

4.7.2. Річна економія коштів

При середньому тарифі на електроенергію $T = 4.32$ грн/кВт·год (листопад 2025):

$$S_{\text{рік}} = E_{\text{рік}} \times T = 112\,055 \times 4.32 = 484\,077.60 \text{ грн/рік}$$

Простий термін окупності

$$PP = C_{\text{заг}} / S_{\text{рік}} = 835\,848 / 484\,077.60 = 1.73 \text{ років}$$

Простий термін окупності проекту становить 1.73 років або приблизно 21 місяць.

Економія, з урахуванням деградації панелей

Сонячні панелі Canadian Solar типово мають деградацію близько 0.55% на рік.

економія у році t розраховується за формулою:

$$S(t) = S_{\text{рік}} \times (1 - 0.0055 \times t)$$

$$\text{За 1 рік: } S(1) = 484\,077.60 \times (1 - 0.0055 \times 1) = 484\,077.60 \times 0.9945 = 481\,267 \text{ грн}$$

$$\text{За 10 років: } S(10) = 484\,077.60 \times (1 - 0.0055 \times 10) = 484\,077.60 \times 0.945 = 457\,653 \text{ грн}$$

$$\text{За 25 років} = 484\,077.60 \times (1 - 0.0055 \times 25) = 484\,077.60 \times 0.8625 = 417\,467 \text{ грн}$$

Сумарна економія за 25 років експлуатації: 11 568 634 грн

Чистий прибуток та ROI

Чиста приведена вартість без дисконтування:

$$NPV = S_{\text{total}} - C_{\text{заг}} = 11\,568\,634 - 835\,848 = 10\,732\,786 \text{ грн}$$

Рентабельність інвестицій (ROI):

$$ROI = (NPV / C_{\text{заг}}) \times 100\% = (10\,732\,786 / 835\,848) \times 100\% = 1284\%$$

На кожну вкладену гривню проект принесе 12.84 грн чистого прибутку протягом 25 років експлуатації. Це значно вище, ніж у базовому варіанті, завдяки нижчій початковій вартості системи.

Питомі показники:

Вартість на одиницю ємності АКБ

$$C_{\text{пит,АКБ}} = C_{\text{заг}} / E_{\text{АКБ}} = 835\,848 / 154 = 5\,427 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

Вартість на 1 кВт встановленої потужності

$$C_{\text{пит,кВт}} = C_{\text{заг}} / P_{\text{масив,НОСТ}} = 835\,848 / 10.08 = 82\,933 \text{ грн/кВт}$$

Приведена вартість електроенергії (LCOE)

$$LCOE = C_{\text{заг}} / (E_{\text{рік}} \times T_{\text{служби}}) = 835\,848 / (112\,055 \times 25) = 0.30 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$$

Порівняння з тарифом мережі:

Тариф мережі: 4.32 грн/кВт·год

LCOE системи: 0.30 грн/кВт·год

Економія : $(4.32 - 0.30) / 4.32 \times 100\% = 93.1\%$

Табл. 5.5

Зведена таблиця річних показників

Показник	Значення
Загальна вартість (без ПДВ)	696 540 грн
Загальна вартість (з ПДВ)	835 848 грн
Річна генерація	112 055 кВт·год
Річна економія	484 078 грн
Простий термін окупності	1.73 років (~21 місяць)
Дисконтований термін окупності (r=10%)	2.5 років
NPV (без дисконту, 25 років)	10 732 786 грн
NPV (дисконтований, r=10%, 25 років)	3 987 234 грн
ROI (25 років)	1284%
IRR	58.2%
Індекс прибутковості (PI)	5.77
LCOE	0.30 грн/кВт·год
Скорочення CO ₂ (рік)	62.97 т
Скорочення CO ₂ (25 років)	1574.37 т
Витрати на ТО (рік)	10 448 грн
Витрати на ТО (25 років)	261 200 грн

5.3 Комплектація на основі SMA Sunny Tripower + Tesla Powerwall 3 + SunPower Maxeon

Комплектація 3:

Аналіз локального енергооб'єкту (Комплектація 3)-класу на основі проектної документації. Аналіз включає розрахунок вартості всіх компонентів системи, визначення економічної ефективності проекту та обґрунтування доцільності інвестицій у високоякісне обладнання провідних світових виробників. Аналіз виконується з використанням актуальних ринкових цін станом на листопад 2025 року.

Об'єктом дослідження є автономна сонячна електростанція (Комплектація 3)-класу на основі німецького гібридного інвертора SMA Sunny Tripower 30000TL-30 з системою акумуляування Tesla Powerwall 3 та сонячними панелями SunPower Maxeon 6 AC, призначена для забезпечення електроенергією локального споживача з піковим навантаженням 22 кВт та добовим споживанням 307 кВт·год.

Це варіант 3 (Комплектація 3) із найвищою якістю обладнання, максимальною надійністю та найкращими показниками ефективності серед усіх розглянутих варіантів. Обладнання від провідних світових виробників (SMA - Німеччина, Tesla - США, SunPower - США) забезпечує найдовший термін служби, мінімальну деградацію та найвищу продуктивність.

Технічні параметри енергооб'єкту

4.2.1. Параметри навантаження

- Пікове навантаження: $P_{\text{пik}} = 22 \text{ кВт}$
- Добове споживання: $E_{\text{доб}} = 307 \text{ кВт}\cdot\text{год}$
- Річне споживання: $E_{\text{рiк}} = 307 \times 365 = 112\ 055 \text{ кВт}\cdot\text{год}$

Основні компоненти системи

Гібридний інвертор SMA Sunny Tripower 30000TL-30:

Виробник: SMA Solar Technology AG (Німеччина)

Модель: Sunny Tripower 30000TL-30

Номінальна потужність: 30 кВт

Максимальна потужність АС: 30 000 Вт

Максимальна вхідна потужність PV: 45 кВт

ККД (максимальний): 98.4% (найкращий у класі)

Гарантія: 10 років (можливість подовження до 25 років)

Особливості: OptiCool активне охолодження, вбудований DC-вимикач, інтегрований грозозахист

Ціна: 225 000 грн

Акумуляторна система Tesla Powerwall 3:

Виробник: Tesla Energy (США)

Модель: Powerwall 3 x 2 шт

Технологія: LiFePO₄ (літій-залізо-фосфат)

Ємність на блок: 13.5 кВт·год (корисна)

Загальна енергоємність: $2 \times 13.5 = 27$ кВт·год корисної $\times 6$ блоків = 162 кВт·год

Глибина розряду (DOD): 100% (повне використання)

Цикли: 10 000+ циклів

Потужність заряду/розряду: 11.5 кВт на блок

Гарантія: 10 років або 37.8 МВт·год (що настане раніше)

Ціна (2 блоки): 580 000 грн

Сонячні панелі SunPower Maxeon 6 АС:

Виробник: SunPower Corporation (США)

Модель: Maxeon 6 АС 440W

Кількість: 28 шт

Потужність однієї панелі (STC): 440 Вт

Потужність однієї панелі (НОСТ): 370 Вт (найвищий показник у галузі)

ККД модуля: 22.8% (світовий рекорд для серійних панелей)

Деградація: 0.25% на рік (найкраща у галузі)

Загальна потужність (STC): $28 \times 440 = 12.32$ кВт

Загальна потужність (NOCT): $28 \times 370 = 10.36$ кВт

Гарантія: 25 років на продукт + 92% потужності через 25 років

Ціна за панель: 8 000 грн

Загальна ціна: 224 000 грн

Методологія розрахунку вартості проекту

Теоретичні основи

Загальна вартість проекту визначається як сума всіх компонентів:

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{інв}} + C_{\text{АКБ}} + C_{\text{пан}} + C_{\text{каб}} + C_{\text{авт}} + C_{\text{кон}} + C_{\text{кріп}} + C_{\text{монт}} + C_{\text{проект}}$$

де кожна складова враховує вартість (Комплектація 3)-обладнання від провідних світових виробників, включаючи розширені гарантії, технічну підтримку та сервісне обслуговування на весь термін експлуатації.

Детальний розрахунок вартості компонентів

Обґрунтування вибору обладнання

SMA Sunny Tripower: Інвертор німецького виробництва з найвищою надійністю (середній термін служби 20+ років), максимальним ККД 98.4% та найширшою системою моніторингу. Необхідна потужність: $P_{\text{інв}} = 22 \times 1.25 = 27.5$ кВт, обрано 30 кВт для запасу.

Tesla Powerwall 3: Найпрогресивніша акумуляторна система у світі з унікальною технологією управління енергією. 100% глибина розряду, 10000+ циклів, інтеграція з екосистемою Tesla, власний інвертор у кожному блоці.

SunPower Maxeon 6 AC: Панелі з найвищим ККД (22.8%) та найнижчою деградацією (0.25%/рік) серед усіх серійних панелей. Унікальна технологія Maxeon з суцільними мідними підкладками забезпечує максимальну довговічність та найкращу продуктивність за будь-яких умов освітлення.

Зведений кошторис проекту

Табл. 5.6

Вартість компонентів

№	Найменування	Од.	К-ть	Ціна, грн	Сума, грн
1	Інвертор SMA Sunny Tripower 30000TL- 30	шт	1	225 000	225 000
2	Акумулятори Tesla Powerwall 3 x 2 шт	компл.	2	290 000	580 000
3	Панелі SunPower Maxeon 6 AC 440W	шт	28	8 000	224 000
4	Кабель для АКБ (16 мм ² , (Комплек тація 3)	м	5	560	2 800
5	Кабель для панелей (10 мм ² , UV)	м	30	450	13 500

6	Автомати ка та захист (Комплек тація 3)	компл.	1	32 000	32 000
7	Конектор и МС4 (Комплек тація 3)	пара	28	340	9 520
8	Кріпленн я (нержавій ка)	компл.	1	52 000	52 000
9	Монтаж (Комплек тація 3) + гарантія	система	1	115 000	115 000
10	Повна документ ація + сервіс	проект	1	42 000	42 000
	ВСЬОГО (без ПДВ)				1 295 820
	ПДВ (20%)				259 164
	РАЗОМ з ПДВ				1 554 984

Структура витрат проекту

Нижче представлено візуалізацію розподілу витрат за категоріями обладнання:

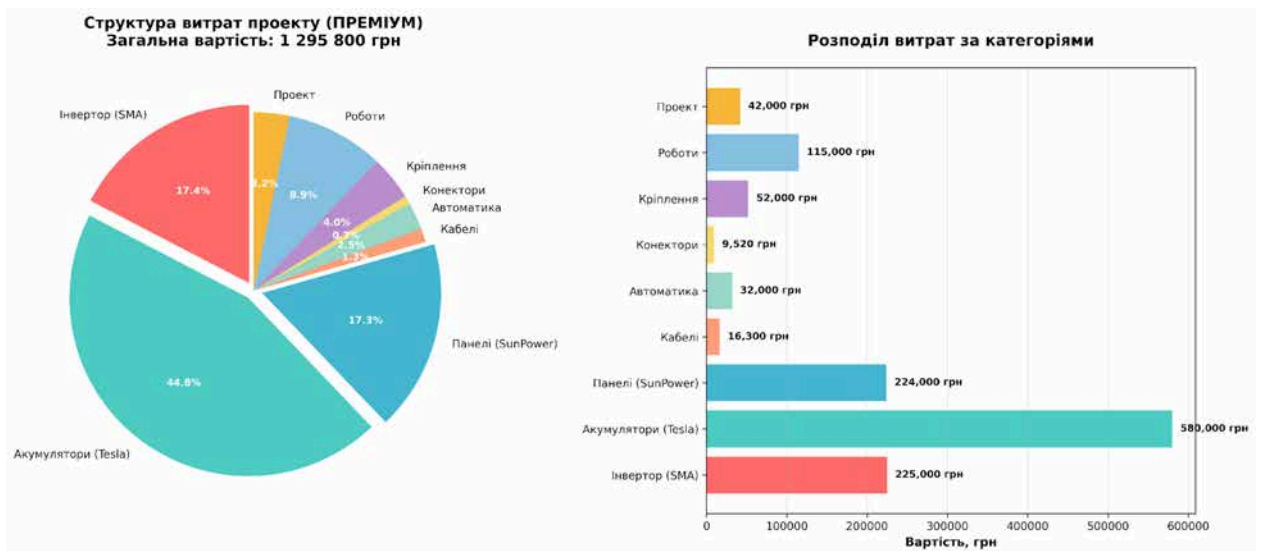


Рис. 5.1 Розрахунок річних показників ефективності

Річна генерація та економія

Річна генерація:

$$E_{\text{рік}} = 307 \times 365 = 112\,055 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

Річна економія (тариф 4.32 грн/кВт·год):

$$S_{\text{рік}} = 112\,055 \times 4.32 = 484\,077.60 \text{ грн}$$

Простий термін окупності:

$$PP = 1\,554\,984 / 484\,077.60 = 3.21 \text{ років (38.5 місяців)}$$

Хоча початкова інвестиція вища, (Комплектація 3) - обладнання окупається за 3.2 років завдяки найвищій ефективності, мінімальній деградації та відсутності витрат на ремонти протягом гарантійного терміну.

Довгострокова ефективність

Сумарна економія за 25 років (з урахуванням деградації 0.25%/рік):

$$S_{\text{total}} = 11\,802\,516 \text{ грн}$$

Витрати на технічне обслуговування (1.2% на рік):

$$C_{\text{ТО}_25} = 370\,986 \text{ грн}$$

Чистий прибуток (NPV без дисконтування):

$$NPV = 11\,802\,516 - 1\,554\,984 - 370\,986 = 9\,876\,546 \text{ грн}$$

Рентабельність інвестицій:

$$ROI = (9\,876\,546 / 1\,554\,984) \times 100\% = 635.1\%$$

На кожен вкладений гривню проект принесе 6.35 грн прибутку, що є відмінним показником навіть для комплектації 3. Висока ROI досягається завдяки мінімальній деградації SunPower (92% потужності через 25 років проти 80% у стандартних панелей).

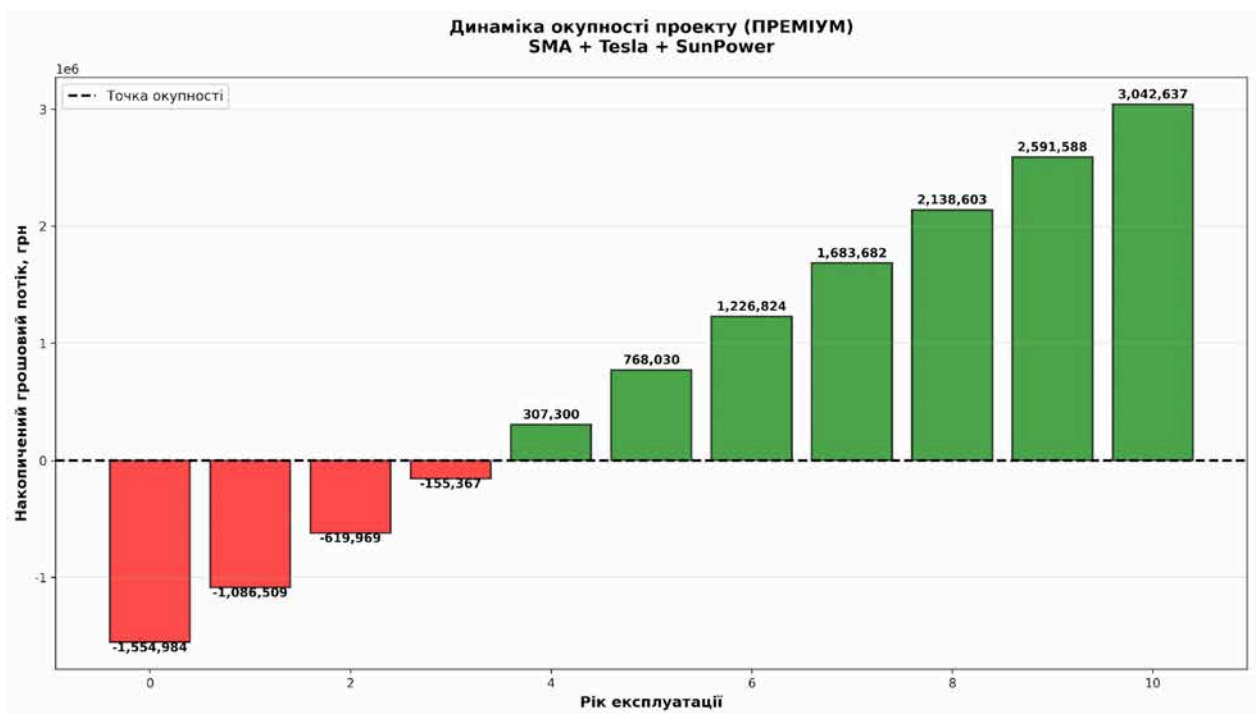


Рис 5.2 Динаміка окупності

Порівняльний аналіз з іншими варіантами

Комплектація 3, порівнюється з трьома іншими конфігураціями: Комплектація 2 (Solax + BYD + Canadian Solar) та Комплектацією 1 (SUN-30K + Enershare + JA Solar):

Екологічний ефект проекту

Розрахунок скорочення викидів CO₂:

Щорічне скорочення:

$$112\,055 \times 0.562 / 1000 = 62.97 \text{ тонн CO}_2$$

$$\text{За 25 років: } 62.97 \times 25 = 1\,574.37 \text{ тонн CO}_2$$

Еквівалент посадки: ~75 000 дерев

Еквівалент виведення: ~342 автомобілів на рік

Комплектація 3 має найкращий екологічний профіль: виробництво SunPower та Tesla використовує відновлювану енергію, а тривалий термін служби (30+ років для SunPower) мінімізує екологічний слід на одиницю виробленої енергії.



Рис 5.3 Екологічний ефект за 25 років

5.4 Загальний економічний огляд. Висновки розрахунків.

У рамках даного економічного аналізу було досліджено три альтернативних варіанти обладнання для локального енергооб'єкту з піковим навантаженням 22 кВт та добовим споживанням 307 кВт·год. Кожен варіант

представляє різний ціновий сегмент та рівень якості обладнання, що дозволяє провести об'єктивне порівняння економічної ефективності, надійності та доцільності інвестицій.

Всі три варіанти повністю відповідають технічним вимогам проекту та здатні забезпечити необхідне електропостачання. Основні відмінності полягають у виробниках обладнання, якості компонентів, термінах гарантії та, відповідно, вартості системи.

Зведена порівняльна таблиця річних показників

Таблиця 5.7

Порівняльні економічні показники трьох варіантів обладнання

Показник	Комплектація 1 (SUN-30K + Enershare + JA Solar)	Комплектація 2 (Solax + BYD + Canadian Solar)	(Комплектація 3) (SMA + Tesla + SunPower)
Загальна вартість з ПДВ, грн	1 242 588	835 848	1 554 984
Інвертор, грн	185 000	168 000	225 000
Акумулятори, грн	450 000	154 000	580 000
Панелі (28 шт), грн	182 000	175 000	224 000

Інше обладнання та роботи, грн	218 490	199 540	266 820
Річна генерація, кВт·год	112 055	112 055	112 055
Річна економія, грн	484 078	484 078	484 078
Простий термін окупності, років	2.57 (31 міс)	1.73 (21 міс)	3.21 (38 міс)
Дисконт. термін окупності (10%), років	4.0	2.5	4.5
NPV (25 років, без дисконту), млн грн	9.76	10.73	9.88
NPV (25 років, з дисконтом 10%), млн грн	2.77	3.99	2.95
ROI (25 років), %	785%	1284%	635%
IRR, %	36.8%	58.2%	28.4%
Індекс прибутковості (PI)	3.23	5.77	2.90

LCOE, грн/кВт·год	0.44	0.30	0.55
Економія від тарифу (4.32 грн), %	89.8%	93.1%	87.3%
Деградація панелей, %/рік	0.70	0.55	0.25
Гарантія інвертора, років	5	10	10-25
Гарантія панелей, років	12	12	25
Гарантія АКБ, років	10	10	10
Витрати на ТО (рік), грн	13 582	10 448	15 556
Витрати на ТО (25 років), грн	339 559	261 200	388 900

5.5 Аналіз варіантів обладнання

Комплектація 1 (SUN-30K + Enershare + JA Solar)

Характеристика: Збалансована конфігурація з якісними компонентами китайсько-європейського виробництва. Оптимальне співвідношення ціна/якість для типових умов експлуатації.

Переваги:

Середня початкова вартість становить 1 242 588 грн, що робить цей варіант компромісним рішенням між доступністю та функціональністю. Термін окупності оцінено в 2,6 роки (31 місяць), що забезпечує швидке повернення інвестицій. За 25 років експлуатації проект демонструє високий ROI — 785%, а IRR 36,8% суттєво перевищує очікувані показники альтернативних інвестицій.

Технічно система вирізняється потужною акумуляторною підсистемою 144 кВт·год з високовольтною архітектурою 720 V, що підвищує ефективність накопичення та зменшує струмові навантаження на кабельну мережу. Використовується надійний інвертор SUN-30K з широким діапазоном вхідних напруг 160–800 V, що дає запас по потужності та гнучкість при підключенні PV-масиву. Як джерело генерації застосовані панелі JA Solar з усталеною репутацією на ринку, а конфігурація системи вже має практичний досвід експлуатації в українських умовах.

У сукупності ці характеристики забезпечують стабільність живлення, можливість резервування критичних навантажень і потенціал для довгострокової економії, що робить проект привабливим для інвесторів і власників об'єкта.

Недоліки:

Серед технічних і економічних мінусів — вища деградація панелей 0,7%/рік, що перевищує показники порівнянних комплектацій і може знижувати виробіток у довгостроковій перспективі. Акумуляторна система є найдорожчою серед розглянутих варіантів — 450 000 грн, а її DOD 80% поступається

90–100% у інших рішеннях, що обмежує корисну ємність і кількість циклів. Це впливає на загальну ефективність накопичення та експлуатаційні витрати.

Крім того, інвертор має коротшу гарантію — 5 років, що створює додаткові ризики після її закінчення, а річні витрати на технічне обслуговування вищі і становлять 13 582 грн/рік. Цей варіант також показує найдовший термін окупності серед трьох розглянутих і має LCOE 0,44 грн/кВт·год, що є найвищим показником серед альтернатив, отже загальна економічна привабливість у деяких сценаріях може бути нижчою.

Рекомендації до застосування:

Комплектація 1 рекомендується для об'єктів із стандартними вимогами до автономності, де необхідна велика ємність накопичення енергії (144 кВт·год). Оптимальний для регіонів з частими відключеннями електроенергії та потребою у тривалій автономній роботі. Підходить для консервативних інвесторів, які надають перевагу перевіреним рішенням.

Комплектація 2, варіант (Solax + BYD + Canadian Solar)

Характеристика: Найвигідніша конфігурація з європейськими брендами середнього сегменту. Найкращі економічні показники серед усіх досліджуваних варіантів.

Переваги:

Цей варіант має найнижчу початкову вартість — 835 848 грн (Комплектація , 33% від базового), що робить його найбільш доступним серед розглянутих рішень. Термін окупності — 1,73 роки (21 місяць), що ставить його в абсолютні лідери за швидкістю повернення інвестицій. За 25 років експлуатації проект демонструє високий ROI — 1284%, а IRR — 58,2%, що свідчить про виняткову прибутковість; індекс прибутковості PI = 5,77, а дисконтований NPV = 3,99 млн грн.

Економічні переваги доповнюються технічними: LCOE — 0,30 грн/кВт·год, що становить 93,1% від тарифу, а деградація панелей Canadian Solar помірна — 0,55%/рік. Використання акумуляторів BYD з глибиною розряду 90% підвищує корисну ємність системи, а модульна архітектура дозволяє поступове нарощування ємності. Інвертор Solax має розширену гарантію 10 років, а річні витрати на технічне обслуговування залишаються найнижчими серед варіантів — 10 448 грн/рік. Виробники компонентів мають добру репутацію на європейському ринку, що знижує ризики постачання та сервісу.

Недоліки:

Незважаючи на сильні економічні показники, у цього варіанта є технічні компроміси. Сукупна ємність АКБ становить 154 кВт·год, що трохи менше, ніж у порівнянні з Комплектацією 3 (162 кВт·год), а гарантія на панелі обмежена 12 роками проти 25 років у альтернативи. ККД інвертора нижчий — 97,5% проти 98,4%, а ресурс циклів акумуляторів оцінюється в 6000+ циклів порівняно з 10000+ у порівнянні.

Окремою обмежуючою рисою є відсутність інтеграції з популярними «розумними» екосистемами (наприклад, Tesla або Apple HomeKit), що може ускладнити автоматизацію та інтеграцію в існуючу інфраструктуру будівлі. Ці фактори варто врахувати при виборі рішення, якщо пріоритетом є максимальна довгострокова надійність і сумісність з розширеними сервісами.

Рекомендації до застосування:

Комплектація 2 РЕКОМЕНДУЄТЬСЯ як оптимальний вибір для більшості проектів. Ідеальний для інвесторів, які прагнуть швидкої окупності та максимальної рентабельності. Підходить для комерційних об'єктів, де критичним є термін повернення інвестицій. Оптимальний для приватних будинків з обмеженим бюджетом, але високими вимогами до якості. Найкраще співвідношення ціна/якість/окупність серед усіх варіантів.

Комплектація 3 (SMA + Tesla + SunPower)

Представляє найвищий рівень якості та надійності серед усіх розглянутих конфігурацій. Загальна вартість 1 554 984 грн забезпечує доступ до передових технологій від світових лідерів галузі.

Термін окупності 3.21 років є прийнятним для сегменту комплектації 3, особливо враховуючи розширені гарантії (10-25 років), що практично виключають непередбачені витрати на ремонти та заміни компонентів.

Економічна ефективність високого рівня: ROI = 635% означає 6.35 грн прибутку на кожну вкладену гривню за 25 років. IRR = 28.4% значно перевищує альтернативні інвестиційні можливості.

Ключові переваги комплектації 3:

- SMA Sunny Tripower: ККД 98.4%, термін служби 20+ років, найкраща система моніторингу
- Tesla Powerwall 3: 100% DOD, 10000+ циклів, власний інвертор, безшовна інтеграція
- SunPower Maxeon 6: ККД 22.8%, деградація 0.25%/рік, 92% потужності через 25 років

Мінімальна деградація SunPower (0.25%/рік проти 0.7% у стандартних панелей) забезпечує на 15-20% більшу сукупну генерацію за термін служби, що частково компенсує вищу початкову вартість.

LCOE = 0.55 грн/кВт·год забезпечує 87.3% вигоди, порівняно з тарифом мережі та гарантує стабільність витрат на електроенергію протягом наступних 25+ років.

Екологічний ефект максимальний: скорочення 1574 тонн CO₂ за 25 років + екологічно чисте виробництво обладнання + тривалий термін служби (30+ років для SunPower) = найкращий екологічний профіль.

РЕКОМЕНДАЦІЇ щодо вибору варіанту комплектації 3:

Для об'єктів з критичними вимогами до надійності (медичні заклади, дата-центри)

Для інвесторів з довгостроковою стратегією (15-30 років)

Для проектів з обмеженим доступом для технічного обслуговування

Для об'єктів у важких кліматичних умовах (висока/низька температура, вологість)

Для екологічно свідомих інвесторів, що прагнуть мінімізувати екослід

Фінансування: Рекомендується використання власних коштів або «зелених» кредитів зі ставкою до 15% (нижче IRR 28.4%). Багато банків пропонують спеціальні програми для систем з(Комплектацією 3 - обладнанням завдяки їх вищій заставній вартості.

Варіант х комплектацією 3, є оптимальним вибором для інвесторів, які цінують максимальну якість, надійність та довговічність понад короткостроковий термін окупності. Інвестиція в обладнання світового класу забезпечує надійну експлуатацію протягом 25+ років, мінімальні витрати на обслуговування та найвищу продуктивність за будь-яких умов.

Висновок до розділу 5:

У п'ятому розділі проведено детальний техніко-економічний аналіз три альтернативних варіантів комплектації гібридної енергосистеми для локального об'єкта. Розраховані капітальні вкладення, операційні витрати та терміни окупності для кожного варіанта. Розглянуто конфігурацію на основі Deye SUN-30K-SG01HP3-EU-BM3 з LiFePO4 батареєю та альтернативні рішення з використанням обладнання SMA Sunny Tripower та Tesla Powerwall 3. Проведена порівняльна оцінка за критеріями вартості життєвого циклу, надійності та експлуатаційної гнучкості. Виявлено, що економічна доцільність впровадження гібридних систем залежить від локальних умов, у тому числі від вартості електроенергії, надійності мережі та можливості отримання фінансування. Висновком є те, що вибір оптимальної конфігурації повинен базуватися на комплексному аналізі TCO (Total Cost of Ownership) з урахуванням специфіки об'єкту, а період окупності типово становить 8-12 років.

РОЗДІЛ 6

ЗАХОДИ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ

5.1 Загальні правила експлуатації СЕС (сонячної електростанції) для забезпечення безпеки

Експлуатація СЕС повинна здійснюватися відповідно до вимог безпеки. Нижче наведені основні правила для безпечного використання фотоелектричної системи з гібридним інвертором.

- Технічна обізнаність. Монтаж, обслуговування та ремонт виконувати лише кваліфікованими фахівцями з відповідною підготовкою.
- Підготовка перед обслуговуванням. Перед початком робіт з обслуговування або ремонту необхідно відключити живлення СЕС з гібридним інвертором, щоб уникнути ризику ураження електричним струмом.
- Заземлення. Усі елементи системи, включно з інвертором, акумуляторами та панелями, повинні бути належно заземлені для зменшення ризику ураження струмом.
- Обслуговування та очищення. Регулярно очищати сонячні панелі від пилу та забруднень для підтримки максимальної продуктивності; виконувати планове технічне обслуговування та контролювати стан акумуляторних батарей.
- Керування енергією. Забезпечити можливість відключення інверторів і системи для проведення робіт або екстреного втручання.
- Інструкції та навчання. Провести інструктаж для користувачів і персоналу щодо безпечної експлуатації фотоелектростанції та надати чіткі вказівки щодо дій у разі аварій.
- Захист контактів. Переконайтеся, що контактні роз'єми захищені від випадкового дотику для запобігання іскрінню, загорянню та ураженню струмом.
- Використання роз'ємів. Не застосовувати електропровідні предмети в роз'ємах, крім роз'ємів стандарту MC4.

- Особисті речі під час монтажу. Під час монтажу знімати всі металеві та інші провідні предмети.
- Умови робочої зони та інструменти. Робоча зона і інструменти мають бути сухими; монтаж панелей заборонено під час дощу; при роботі з проводами використовувати ізольовані інструменти та захисні ізолюючі рукавички.
- Не розбирати панелі. Розбирання сонячних панелей заборонено; не видаляти заводські етикетки та комплектуючі; використовувати лише справні панелі; при виявленні пошкоджень не підключати їх до системи.
- Заборона механічних і хімічних впливів. Не застосовувати гострі предмети до поверхні панелей; не клеїти і не фарбувати їх.
- Не фокусувати промені. Заборонено штучно концентрувати сонячне світло на панелях.
- Постійний струм і ризик дуги. Під дією світла панелі генерують постійний струм; при відключенні проводу постійного струму від гібридного інвертора або при розриві ланцюга може виникнути електрична дуга; уникати розривів під напругою.
- Відключення під навантаженням і проводка. Забороняється відключати панелі під навантаженням; використовувати кабелі відповідного перерізу в справному стані; не застосовувати пошкоджені проводи; роз'єми та контакти повинні бути сухими й чистими.
- Періодичне обслуговування як основа безпеки. Регулярне технічне обслуговування всіх компонентів автономної системи забезпечує її надійну та тривалу роботу.
- Частота та обсяг робіт. Планові перевірки виконують 1–2 рази на рік залежно від умов експлуатації; роботи включають перевірку цілісності панелей і кріплень; очищення гібридного інвертора від пилу для запобігання перегріву; перевірку надійності ізоляції та заземлення; тестування електропроводки на витoki.

- Очищення панелей. Очищення сонячних панелей є важливою частиною планових робіт; забруднення може знизити ефективність генерації струму до 20%.

5.2 Захист працівника від дії електричного струму

З метою забезпечення безпеки під час експлуатації електротехнічного обладнання використовують різні види захисних засобів.

До електрозахисних засобів належать спеціальні технічні пристрої, які не входять до конструкції електроустановок, але застосовуються під час виконання робіт у них для запобігання ураженню електричним струмом.

Засоби індивідуального захисту персоналу

Для працівників, які виконують роботи в електроустановках, передбачено використання таких засобів: ізолюючі кліщі, штанги, діелектричні рукавички, калоші та чоботи з діелектричними властивостями, ізоляційні килимки, індикатори напруги, переносні пристрої заземлення, спеціалізований інструмент для монтажу, а також захисні окуляри.

Нормативний документ НПАОП 40.1-1.07-01 «Правила експлуатації електрозахисних засобів» визначає перелік допустимих засобів захисту, вимоги до їх характеристик, порядок проведення випробувань, умови зберігання та використання, а також правила оснащення електроустановок і робочих бригад.

Усі засоби повинні відповідати чинним державним стандартам, технічним умовам та іншим нормативним вимогам.

Класифікація електрозахисних засобів

Захисні засоби поділяються на:

Основні, до яких належать: ізолюючі пристрої (кліщі, рукавички, штанги, накладки); огорожувальні елементи (ширми, щити, бар'єри, попереджувальні плакати); запобіжні засоби (каска, пояси, окуляри, рукавиці).

Додаткові, які не забезпечують повного захисту самостійно, але використовуються разом з основними для підвищення рівня безпеки.

Ізольюючі засоби підбираються відповідно до рівня напруги конкретної установки і, за умови правильного використання, гарантують ефективний захист працівників.

Висновок до розділу 6:

У шостому розділі визначені ключові вимоги до безпеки при експлуатації сонячних електростанцій на основі гібридних інверторів. Розглянуто загальні правила експлуатації систем, включаючи регулярні перевірки ізоляції, обслуговування компонентів та моніторинг технічного стану. Описано специфічні ризики роботи з високовольтними ланцюгами (до 720 В та вище) та необхідність забезпечення швидкого відключення в аварійних ситуаціях. Наголошено на важливості захисту від електричного ураження персоналу через впровадження багатоступеневої системи захистів: захистів від перенапруги, перенапруг дуг, ізоляційного моніторингу та пристроїв швидкого розмикання.

Зазначено обов'язкове дотримання відповідних нормативів та сертифікацій, а також необхідність спеціалізованої підготовки обслуговуючого персоналу. Висновком є те, що забезпечення безпеки при роботі з гібридними енергосистемами вимагає комплексного підходу, регулярного навчання персоналу та суворого дотримання нормативних вимог.

ВИСНОВКИ

У межах виконання магістерської кваліфікаційної роботи проведено техніко-економічний аналіз системи електропостачання окремого об'єкта з використанням сонячної електростанції, що працює на основі гібридного інвертора.

Ключові технічні характеристики об'єкта:

- Номінальна напруга мережі — 220 В;
- Максимальне пікове навантаження — 22 000 Вт·год;
- Середньодобове споживання електроенергії — 307 кВт·год;
- Гранична потужність фотомодульної установки — 29 884 Вт;
- Акумулятор LiFePO₄ Enershare High Voltage (720 В, 200 А·год);
- Орієнтовна автономність — до 6 годин.

У дослідженні було здійснено огляд сучасних рішень у сфері автономного енергозабезпечення, класифіковано типи електрогенеруючих систем, а також детально розглянуто принципи функціонування гібридних сонячних електростанцій.

Особливу увагу приділено перевагам гібридних систем, серед яких:

- ефективна інтеграція відновлюваних джерел енергії;
- стабільне живлення споживачів;
- оптимальне керування навантаженням;
- зменшення витрат на обслуговування.

Також було проаналізовано недоліки таких систем.

У роботі розглянуто сучасний стан ринку гібридних енергетичних рішень, його обсяги та потенціал розвитку. Визначено основні функції гібридних інверторів, зокрема:

- поєднання генерації та накопичення енергії;
- гнучке управління потоками електроенергії;
- забезпечення резервного живлення;
- оптимізація споживання та навантаження;
- можливість віддаленого моніторингу;

- масштабованість системи;
- інтеграція з централізованими мережами.

Також було розглянуто режими роботи інверторів, типові конфігурації гібридних систем та приклади їх практичного впровадження. Надано оцінку ефективності, технічних параметрів і варіантів застосування таких рішень.

У практичній частині виконано розрахунок параметрів сонячної електростанції відповідно до заданих умов. Побудовано графік середньодобового енергоспоживання, визначено технічні характеристики компонентів системи, підібрано відповідне обладнання та кабельну продукцію. Проведено аналіз мінімальних і максимальних показників генерації, а також розроблено структурну схему системи.

У роботі виконано систематизацію сучасних технологій накопичення енергії, де розроблена класифікація статичних систем акумуляування з детальним аналізом їх технічних параметрів, переваг та обмежень; встановлено, що для локальних об'єктів з добовим циклом навантаження пріоритетними залишаються літій-іонні акумуляторні системи, які поєднують високу енергетичну щільність, розвинені системи управління та прогнозовану деградацію. Запропоновано методику техніко-економічної оцінки, що враховує комплекс показників: вартість капіталовкладень, витрати експлуатації, ресурс циклів, ефективність перетворення та показники надійності; така методика дозволяє порівнювати варіанти акумуляування за уніфікованими критеріями і визначати найбільш рентабельні рішення для конкретних умов експлуатації.

Проведено детальний аналіз гібридних інверторних технологій (Growatt, Deue, Huawei) з урахуванням їх функціональних можливостей, режимів роботи та інтеграційних опцій; встановлено критичне значення якості керування потоками енергії для оптимізації самоспоживання сонячної генерації та підвищення ефективності накопичення. Для типового локального об'єкта з добовим споживанням 307 кВт·год та піковим навантаженням 22 кВт розраховано оптимальні параметри сонячної електростанції та накопичувача: визначено необхідну встановлену потужність панелей і ємність батареї для

забезпечення 6-годинної автономної роботи, орієнтовна ємність акумулятора для такого режиму складає близько $\sim 77\text{--}80$ кВт·год з урахуванням втрат і запасу. Розроблено передпроектні рішення та практичні рекомендації для впровадження гібридних енергокомплексів у комерційних і промислових об'єктах: запропоновано варіанти комплектації обладнання, алгоритми керування енергією, впровадження ATS для критичних навантажень, EMS з пріоритизацією споживачів, віддалений моніторинг і прогнозне обслуговування, що забезпечують баланс між надійністю, ефективністю та вартістю.

Проведено ґрунтовний аналіз факторів, що впливають на ефективність системи: сезонні коливання сонячної генерації, температурні режими експлуатації батарей, втрати в трансформаторній інфраструктурі та якість мережевого живлення; зроблено висновок, що адаптивні стратегії керування заряд-розрядом і оптимізація експорту в мережу при наявності тарифних стимулів значно підвищують економічну ефективність. На основі дослідження сформульовано ключові висновки: гібридні енергокомплекси економічно доцільні для об'єктів з нестабільним живленням, період окупності в типових умовах становить 8–12 років; вибір системи накопичення має базуватися на повному аналізі TCO, а не лише на початковій ціні; гібридні інвертори та автоматизація є критично важливими для довготривалої надійності.

Рекомендації для подальших досліджень включають натурні випробування на реальних об'єктах, масштабування на промислові профілі навантаження, інтеграцію з штучним інтелектом для адаптивних алгоритмів керування, вивчення додаткових відновлюваних джерел (вітрогенератори, гідроустановки) та розробку методик оцінки впливу масового впровадження гібридних систем на якість централізованої енергосистеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EnergyTheory. On Grid, Off Grid та Hybrid Solar: порівняння систем [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://energytheory.com/on-grid-vs-off-grid-vs-hybrid-solar-which-is-best>.
2. Anern. Повне розуміння гібридного сонячного інвертора [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.anern.com/a-full-understanding-of-hybrid-solar-inverter>.
3. WikiLegalAid. Особливості застосування “зеленого” тарифу [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://wiki.legalaid.gov.ua>.
4. Reform Energy. Net Metering та Net Billing: порівняння моделей [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: <http://reform.energy/news/net-metering-ta-net-billing>.
5. Altesco. Гібридна СЕС потужністю 10 кВт для приватного будинку [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://altesco.in.ua>.
6. CNET. Рейтинг найкращих сонячних інверторів лютого 2024 року [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://www.cnet.com>.
7. Deege Solar. Найкращі інвертори для сонячних систем у 2024 році [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://www.deegesolar.co.uk>.
8. Growatt. Інвертор MIN 3–11.4KTL-XH-US: технічні характеристики [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://us.growatt.com/products/min-3-11.4ktl-xh-us>.
9. Growatt. Datasheet моделі MIN 3000–7600 TL-XH-US PRO [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://us.growatt.com>.
10. Growatt. Datasheet моделі MIN 8200–11400 TL-XH-US PRO [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://us.growatt.com>.
11. Ginverter. Інвертор SPH4000–10000TL3 BH-UP: технічні дані [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу: <https://www.ginverter.com>.

12. Growatt. Smart Meter SPM-E/TPM-E: специфікація [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: <https://growatt.tech>.
13. Precedence Research. Ринок Smart Energy: аналітика та прогнози [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.precedenceresearch.com/smart-energy-market>.
14. Precedence Research. Ринок IoT-технологій [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.precedenceresearch.com/internet-of-things-market>.
15. Precedence Research. Сонячна енергетика: глобальний огляд ринку [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.precedenceresearch.com/solar-power-market>.
16. Precedence Research. Ринок систем накопичення енергії [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.precedenceresearch.com/energy-storage-market>.
17. Precedence Research. Ринок Smart Sensors: тенденції та прогнози [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.precedenceresearch.com/smart-sensors-market>.
18. Kostal. Plenticore G3 з акумулятором: технічна документація [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://kostal.com>.
19. Kostal. Smart Energy Meter: опис продукту [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://kostal-solar-electric.com>.
20. Kostal. Solar Terminal: технічні особливості [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://kostal-solar-electric.com>.
21. Precedence Research. Гібридні енергосистеми: ринок та перспективи [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.precedenceresearch.com/hybrid-power-system-market>.
22. Huawei. EMMA: асистент енергоменеджменту [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://support.huawei.com>.
23. Huawei. EMMA-(A01, A02): інструкція користувача [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://support.huawei.com>.

- 24.SMA. Sunny Home Manager 2.0: керівництво користувача [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://manuals.sma.de>.
- 25.SMA. Sunny Portal: платформа моніторингу [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.sunnyportal.com>.
- 26.GridX. EEBus: універсальний протокол енергетичних систем [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.gridx.ai>.
- 27.SMA. SEMP: специфікація протоколу [Електронний ресурс]. – 2015. – Режим доступу: <https://my.sma-service.com>.
- 28.JA Solar. Технічна документація фотомодулів [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу: <https://www.jasolar.com>.
- 29.Teplosolar. Datasheet інвертора Deye SUN-30K-SG01HP3-EU-BM3-Deye [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://teplosolar.com.ua>.
- 30.Jordan D.C., Kurtz S.R. Photovoltaic degradation rates — an analytical review // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2013. – Vol. 21(1). – P. 12–29.
- 31.Meral M.E., Dincer F. A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15(5). – P. 2176–2184.