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

ПОГОДЖЕНО	**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**
Директор ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження	**Завідувач кафедри інженерії енергосистем**
_____ /Каплун В.В./	**_____ /Антипов Є.О./**
(підпис)	(підпис)
«____» _____ 2025 р.	«____» _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Розробка комбінованої системи електропостачання домогосподарства з використанням вітросонячної установки»

Спеціальність _141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)
Освітня програма _Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка_
(назва)
Орієнтація освітньої програми___освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми
Доцент, кандидат технічних наук _____ ____Усенко С.М.____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи
Доцент, кандидат технічних наук _____ _____Антипов Є.О _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав _____ _____Шопін М.Є._____
(підпис) (ПІБ)

КИЇВ – 2025

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем
к.т.н доцент _____ Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
«____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

ШОПІН МИХАЙЛО ЄВГЕНОВИЧ
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)
Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи **«Розробка комбінованої системи електропостачання домогосподарства з використанням вітросонячної установки»** затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2061 «С»
Термін подання завершеної роботи на кафедру 14.11.2025 р.
(рік, місяць, число)
Вихідні дані до магістерської роботи ПУЕ, ДБН, ДНАОП, ГКД, ситуаційний план місцевості з геолокацією, архітектурний план будівлі, каталоги виробників обладнання
Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку відновлюваної енергетики.
2. Проєктування комбінованої системи електропостачання.
3. Моделювання та аналіз роботи системи.
4. Економічне обґрунтування та екологічний аналіз
5. Правила експлуатації та безпека

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

Дата видачі завдання «18» Листопада 2024 р.

Керівник магістерської роботи _____ Антипов Є.О

Завдання прийняв до виконання _____ Шопін М.Є

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: 81 с., 22 рисунки, 25 джерел.

Об’єкт дослідження – процес забезпечення енергетичної автономності приватного домогосподарства.

Предмет дослідження – параметри та режими роботи гібридної вітросонячної електростанції, а також її техніко-економічні показники.

Мета роботи – розробка та комплексне техніко-економічне обґрунтування проєкту автономної гібридної системи електроживлення для приватного домогосподарства з використанням сонячних панелей та вітрової установки.

У роботі проведено аналіз сучасного стану відновлюваної енергетики в Україні, обґрунтовано доцільність використання комбінованих систем електропостачання для забезпечення стабільного живлення домогосподарств. Визначено енергетичний профіль споживання, підібрано оптимальні типи обладнання, виконано погодинне моделювання генерації електроенергії з урахуванням сезонних коливань та розраховано енергетичний баланс системи.

Розроблена модель враховує змінну генерацію, навантаження, рівень заряду акумуляторної батареї та реалізує логіку перемикання джерел живлення. Проведено техніко-економічне обґрунтування проєкту, включаючи розрахунок капітальних витрат, щорічної економії, доходу від продажу надлишкової електроенергії за «зеленим» тарифом та скоригованого терміну окупності.

Результати дослідження підтверджують ефективність запропонованої системи та її здатність забезпечити енергетичну автономію домогосподарства в умовах нестабільного зовнішнього електропостачання.

Ключові слова: енергетична автономія, гібридна система, сонячна енергетика, вітроустановка, акумуляторна батарея, моделювання, техніко-економічне обґрунтування, зелений тариф, енергетичний баланс.

ABSTRACT

Master’s qualification thesis: 81 pages, 22 figures, 25 sources.

Object of the study – the process of ensuring energy autonomy for a private household.

Subject of the study – the parameters and operating modes of a hybrid wind-solar power system, as well as its techno-economic indicators.

Purpose of the thesis – to develop and comprehensively justify a project for an autonomous hybrid power supply system for a private household using solar panels and a wind turbine.

This work presents an analysis of the current state of renewable energy in Ukraine and substantiates the feasibility of implementing combined power supply systems to ensure stable electricity for households. The energy consumption profile is defined, optimal equipment types are selected, and hourly modeling of electricity generation is performed with consideration of seasonal fluctuations and system energy balance.

The developed model accounts for variable generation, load demand, battery charge level, and implements logic for switching between power sources. A techno-economic justification of the project is provided, including calculations of capital expenditures, annual savings, potential income from selling surplus electricity under the “green” tariff, and the adjusted payback period.

The results confirm the effectiveness of the proposed system and its ability to ensure household energy autonomy under conditions of unstable external power supply.

Keywords: energy autonomy, hybrid system, solar energy, wind turbine, battery storage, modeling, techno-economic justification, green tariff, energy balance.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 8

ВСТУП 9

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ 10

1.1. Сучасний стан енергозабезпечення домогосподарств 10

1.2 Основи роботи сонячних та вітрових установок 12

1.3 Комбіновані системи електропостачання: переваги та недоліки 16

1.4 Аналіз ринку обладнання для вітро- та сонячної енергетики в Україні 19

1.5. Нормативно-правова база щодо використання ВДЕ в домогосподарствах 23

Висновки по розділу 1 25

РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ 26

2.1. Визначення енергетичних потреб домогосподарства 26

2.2. Вибір конфігурації системи: автономна, гібридна або мережева 31

2.3 Розрахунок потужності сонячної електростанції (СЕС) 33

2.4 Розрахунок параметрів вітроелектричної установки (ВЕУ) 35

2.5 Вибір типу та параметрів акумуляторної системи 38

2.6. Система управління та автоматика 39

Висновки до розділу 2 42

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ 43

3.1. Вибір середовища для моделювання 43

3.2. Побудова моделі комбінованої системи 44

3.3 Аналіз добової та сезонної генерації і споживання електроенергії 47

3.5. Аналіз надійності електропостачання 57

Висновки до розділу 3 58

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ 59
4.1. Оцінка вартості реалізації проєкту 59
4.2. Розрахунок строку окупності системи 61
4.3. Порівняння з традиційними джерелами енергії (мережева електрика, генератор) 62
4.4. Розрахунок зниження викидів CO_2 та екологічного ефекту 64
Висновки до розділу 4 66
РОЗДІЛ 5 ПРАВИЛА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА БЕЗПЕКА 67
5.1. Вимоги до встановлення обладнання 67
5.2. Системи захисту: від перевантаження, короткого замикання, перенапруги 68
5.3. Інструкції з обслуговування та ремонту 70
5.4. Заходи безпеки при експлуатації вітросонячних установок 72
Висновки до розділу 5 74
ВИСНОВКИ 75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 77
ДОДАТКИ 83

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АС – акумулювальна система;

АКБ – акумуляторна батарея;

ВЕС – вітрова електростанція;

ВЕУ – вітроелектроустановка;

ГАЕС – гідроакумулювальна електростанція;

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;

ДЕС – дизельна електростанція;

КВВП – коефіцієнт використання встановленої потужності;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

НПІНЕ – надпровідниковий індуктивний накопичувач енергії;

ПАБ – потокова акумуляторна батарея;

ПАЕС – повітряно-акумулювальна електростанція;

ПЕ – паливний елемент;

САЕП – система автономного електропостачання;

СЕС – сонячна електростанція;

СК – суперконденсатор;

СМ – супермаховик;

СФЕУ – сонячна фотоелектрична установка;

ТВЕ – технології відновлюваної енергетики;

ФЕП – фотоелектрична панель.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку глобальної та національної енергетики характеризується глибинними трансформаціями, зумовленими комплексом економічних, екологічних та безпекових викликів. Нестримне зростання вартості традиційних енергоносіїв, посилення кліматичних змін та загальна політична нестабільність змушують кардинально переосмислювати підходи до енергозабезпечення на всіх рівнях. Для України ці глобальні тенденції набувають особливої гостроти. Техногенна зношеність централізованих електромереж, їхня вразливість до зовнішніх загроз та періодичні дефіцити генеруючих потужностей ставлять під питання надійність та безперебійність електропостачання, що є базовою умовою комфортного та безпечного життя.

За цих умов концепція енергетичної автономії перестає бути нішевим технологічним рішенням і перетворюється на нагальну практичну потребу, особливо у секторі приватних домогосподарств. Можливість забезпечити себе власною електроенергією, незалежно від стану зовнішніх мереж, стає ключовим фактором енергетичної безпеки та стійкості.

Найбільш перспективним шляхом до досягнення такої автономії є використання відновлюваних джерел енергії. Проте кліматичні особливості України, з їхньою вираженою сезонністю, створюють суттєві перешкоди для ефективного використання сонячних чи вітрових установок окремо. Пікова продуктивність сонячних панелей влітку нівелюється їхнім різким спадом взимку, тоді як вітровий потенціал, навпаки, є найвищим саме в холодну пору року. Ця природна асинхронність наштовхує на очевидне, але технічно складне рішення – створення гібридних систем, здатних комплексно використовувати переваги обох технологій.

Саме тому дослідження, спрямовані на розробку та обґрунтування ефективних комбінованих вітросонячних систем для приватних домогосподарств, набувають сьогодні виняткової актуальності. Це не просто задача інженерного проєктування, а комплексне науково-технічне завдання, що лежить на перетині енергетики, кліматології та економіки, і вирішення якого здатне запропонувати реальний шлях до енергетичної незалежності для тисяч українських родин.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1. Сучасний стан енергозабезпечення домогосподарств

Енергозабезпечення домогосподарств в Україні на сучасному етапі перебуває у стані глибокої трансформації, що зумовлена як глобальними тенденціями переходу до низьковуглецевої економіки, так і внутрішніми викликами, пов'язаними з безпековою ситуацією, техногенними ризиками та зношеністю інфраструктури. З початку повномасштабного вторгнення в Україну понад 42% генеруючих потужностей енергосистеми були зруйновані або окуповані, включаючи Запорізьку АЕС (6 ГВт), більшість вугільних ТЕЦ та значну частину гідро- і «зеленої» генерації [1].

Централізована система електропостачання, яка історично забезпечувала більшість домогосподарств, виявилася надзвичайно вразливою до зовнішніх впливів. Часті аварійні відключення, обмеження споживання, дефіцит потужностей у пікові періоди — усе це змусило населення шукати альтернативні шляхи забезпечення базових енергетичних потреб. Особливої актуальності набули автономні та резервні системи живлення, зокрема генератори, акумуляторні станції, а також установки на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

За даними Національного інституту стратегічних досліджень, одним із ключових напрямів державної політики стало зміцнення індивідуальної енергетичної стійкості населення. Це включає стимулювання інвестицій у енергоефективність приватних будинків, впровадження ВДЕ та модернізацію внутрішніх електромереж [2]. Водночас, рівень енергоефективності житлового фонду залишається низьким: значна частина будинків не має належної теплоізоляції, а внутрішні електромережі не пристосовані до роботи з альтернативними джерелами.

Станом на 2024 рік, частка домогосподарств, які використовують сонячні електростанції (СЕС), зросла до понад 50 тисяч об'єктів, що становить близько 1% від загальної кількості житлових будівель. Водночас, вітрові установки залишаються

менш поширеними через складність монтажу, більші капітальні витрати та нормативні обмеження. Проте саме комбіновані системи, які поєднують сонячну та вітрову генерацію, демонструють найвищий потенціал у забезпеченні стабільного енергопостачання в умовах сезонних коливань.

Згідно з аналітичними даними компанії BDO, Україна активно працює над диверсифікацією джерел генерації, зменшенням залежності від імпортованих енергоресурсів та розвитком децентралізованих систем. Водночас, військові дії призвели до суттєвих втрат інфраструктури, що ускладнює реалізацію масштабних проєктів у сфері ВДЕ [3]. У цьому контексті саме домогосподарства, як малі автономні одиниці, мають найбільший потенціал для швидкої адаптації та впровадження енергоефективних рішень. На відміну від централізованих систем, які потребують масштабної інфраструктури та значних інвестицій, локальні установки на основі ВДЕ можуть бути впроваджені швидко, гнучко та з мінімальними витратами. Вони дозволяють не лише зменшити навантаження на загальну мережу, а й створити розподілену систему енергозабезпечення, стійку до зовнішніх загроз. Таким чином, розвиток автономних енергетичних рішень на рівні домогосподарств є не лише технологічно доцільним, а й стратегічно важливим для енергетичної безпеки країни.

Окрему увагу слід приділити соціальному аспекту. Зростання тарифів на електроенергію, нестабільність постачання та ризики відключень створюють додаткове навантаження на бюджети родин. За оцінками експертів, витрати на енергетичні послуги в умовах низької енергоефективності можуть становити до 30% загального бюджету домогосподарства. Це стимулює попит на альтернативні рішення, зокрема системи з накопиченням енергії, інтелектуальні контролери споживання та автономні джерела живлення.

У регіональному розрізі найбільшу активність у впровадженні ВДЕ демонструють домогосподарства в західних та центральних областях України, де кліматичні умови сприятливі для сонячної генерації, а також існує розвинена інфраструктура підтримки. У південних регіонах, попри високий сонячний потенціал, темпи впровадження стримуються безпековими ризиками. Водночас, у східних областях, де вітровий потенціал є вищим, перспективними є саме комбіновані системи.

Таким чином, сучасний стан енергозабезпечення домогосподарств в Україні характеризується високим рівнем викликів, але водночас — значним потенціалом для розвитку автономних систем на основі ВДЕ. Комбіновані вітросонячні установки, здатні забезпечити стабільне та екологічно чисте електропостачання, стають не лише технологічною альтернативою, а й стратегічним інструментом підвищення енергетичної безпеки населення.

1.2 Основи роботи сонячних та вітрових установок

Сонячна енергія є одним із найперспективніших джерел відновлюваної енергії, що базується на прямому перетворенні сонячного випромінювання в електричну або теплову енергію. Основним елементом фотоелектричних систем є сонячна панель, яка складається з фотоелектричних комірок — напівпровідникових елементів, здатних генерувати електричний струм під дією світла. Найпоширенішими матеріалами для виготовлення таких комірок є монокристалічний та полікристалічний кремній, що забезпечують високий рівень ефективності та довговічності.

Залежно від технології виготовлення, сонячні батареї поділяються на три покоління:

Перше покоління — кремнієві комірки (моно- та полікристалічні), які займають понад 90% ринку.

Друге покоління — тонкоплівкові модулі (CdTe, CIGS, аморфний кремній), що мають нижчу ефективність, але дешевші у виробництві.

Третє покоління — органічні та перовскітні комірки, які демонструють швидке зростання ККД, але потребують доопрацювання в аспектах довговічності та стабільності.

Таблиця 1.1

Порівняння типів сонячних модулів

Тип модуля	Матеріал	ККД, %	Термін служби	Вартість	Особливості застосування
Монокристалічний	Кремній (монокристал)	18-22	25-30 років	висока	Висока ефективність, компактність
Полікристалічний	Кремній (полікристал)	15-18	20-25 років	середня	Дешевші, але менш ефективні
Тонкоплівковий	CdTe, CIGS, аморфний	10-13	10-15 років	низька	Гнучкі, легкі, для нестандартних поверхонь
Органічний	Перспективний матеріал	15-25 (експеримент)	5-10 (очікувано)	низька/середня	Високий потенціал, потребують доопрацювання

Сучасні сонячні електростанції (СЕС) можуть працювати в автономному, мережевому або гібридному режимі. У гібридних системах електроенергія, що виробляється панелями, накопичується в акумуляторах або передається до мережі через інвертор. Для підвищення ефективності використовуються технології PERC, bifacial-модулі, половинчасті комірки та інші інновації [4].

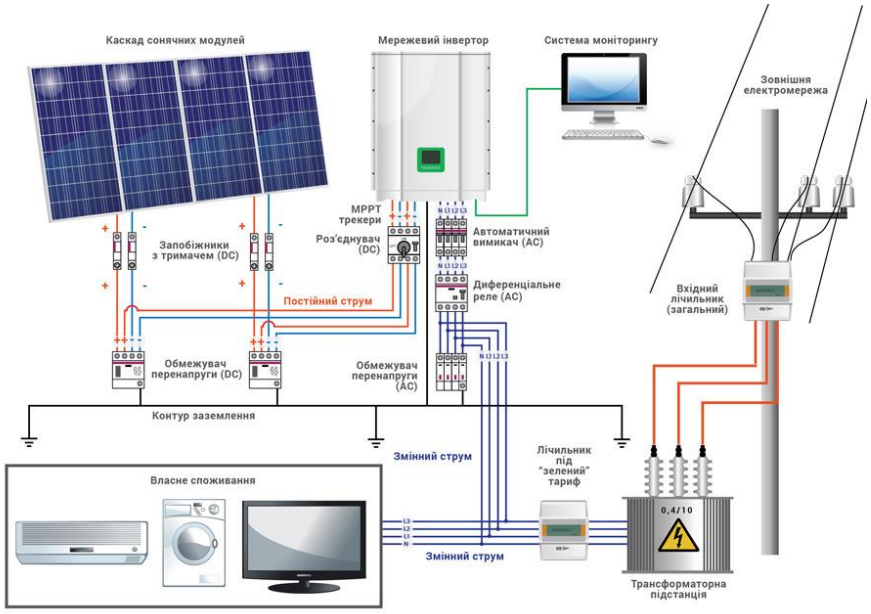


Рис. 1.1. Схема роботи сонячної електростанції

Вітроенергетична установка (ВЕУ) — це комплекс обладнання, що перетворює кінетичну енергію вітру в електричну. Основними елементами ВЕУ є вітродвигун, трансмісія, електрогенератор та опорна конструкція. Принцип роботи полягає в тому, що потік повітря обертає лопаті ротора, створюючи крутильний момент, який через систему передачі передається на вал генератора [5].

За конструкцією ВЕУ поділяються на:

Горизонтально-осьові установки — найпоширеніші, мають високий ККД (до 45%), потребують орієнтації на вітер.

Вертикально-осьові установки — простіші в обслуговуванні, не потребують орієнтації, але мають нижчу ефективність і схильні до автоколивань [6].

Рис. 1.2. Конструктивна схема ВЕУ з горизонтальною віссю обертання

Вітроприймальний механізм разом із редуктором утворюють вітродвигун. Завдяки особливій формі лопатей у повітряному потоці виникають асиметричні сили, що створюють крутний момент.

Сьогодні найбільш поширеними є горизонтально-осьові пропелерні вітроустановки, які працюють на основі підйомної сили лопатей. Вони вважаються ефективнішими завдяки високому коефіцієнту використання енергії вітру (рс = 0,35…0,45), достатньому пусковому моменту та здатності швидко входити в робочий режим при швидкості вітру 3–5 м/с.

Вітроустановки з вертикальною віссю (рис. 1.3) обертання мають власні переваги порівняно з горизонтальними. Для них немає потреби у системах орієнтації на напрям вітру, конструкція є простішою, а гіроскопічні навантаження на лопаті, систему передачі та інші елементи значно менші. Крім того, у таких установках можна розташувати редуктор і генератор у нижній частині башти, що полегшує обслуговування.

Рис. 1.3. Конструктивна схема ВЕУ з вертикальною віссю обертання

До недоліків вітроустановок з вертикальною віссю можна віднести такі:

– значно вища схильність до втомних руйнувань, що спричиняється автоколивальними процесами, які виникають доволі часто;

– наявність пульсацій крутного моменту, що викликає коливання потужності та інших параметрів генераторів;

– за результатами останніх випробувань ВЕУ типу Дар'є та Н-ротора потужністю 5 МВт встановлено, що основною слабкою ланкою є підп’ятник-підшипник головного валу. Саме його руйнування стало причиною припинення проєктів зі створення потужних вертикально-осьових вітроустановок, тоді як розробки установок малої потужності успішно продовжуються.

Класифікація ВЕУ за потужністю наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Класифікація вітроустановок

Клас установки	Потуж-ність, МВт	Діаметр колеса, м	Кількість лопатей	Призначення
Малої потужності	До 0,1	3 – 10	2-3	Зарядка акумуляторів, побутові потреби
Середньої потужності	0,1 – 1,0	25-44	2-3	Енергетика
Великої потужності	Понад 1,0	>45	2-3	Енергетика

Сонячні та вітрові установки є ключовими компонентами сучасної енергетики, що забезпечують екологічно чисту генерацію електроенергії. Їхнє поєднання в межах комбінованих систем дозволяє компенсувати сезонні та добові коливання продуктивності, забезпечуючи стабільне енергопостачання домогосподарств. Розуміння принципів роботи, класифікації та технологічних особливостей є необхідною передумовою для ефективного проєктування таких систем.

1.3 Комбіновані системи електропостачання: переваги та недоліки

Комбіновані системи електропостачання — це енергетичні комплекси, що поєднують декілька джерел генерації, зокрема відновлювані (сонячні, вітрові) та резервні (мережева електрика, дизельні генератори, акумуляторні системи). Їхнє головне

завдання — забезпечити стабільне, безперебійне та ефективне енергозабезпечення об’єкта незалежно від зовнішніх умов.

У контексті домогосподарств комбіновані системи дозволяють компенсувати недоліки окремих джерел енергії. Наприклад, сонячна генерація має високу продуктивність у літній період, але суттєво знижується взимку, тоді як вітрова — навпаки, активізується в холодну пору року. Поєднання цих джерел дозволяє досягти більш рівномірного профілю генерації протягом року [7].

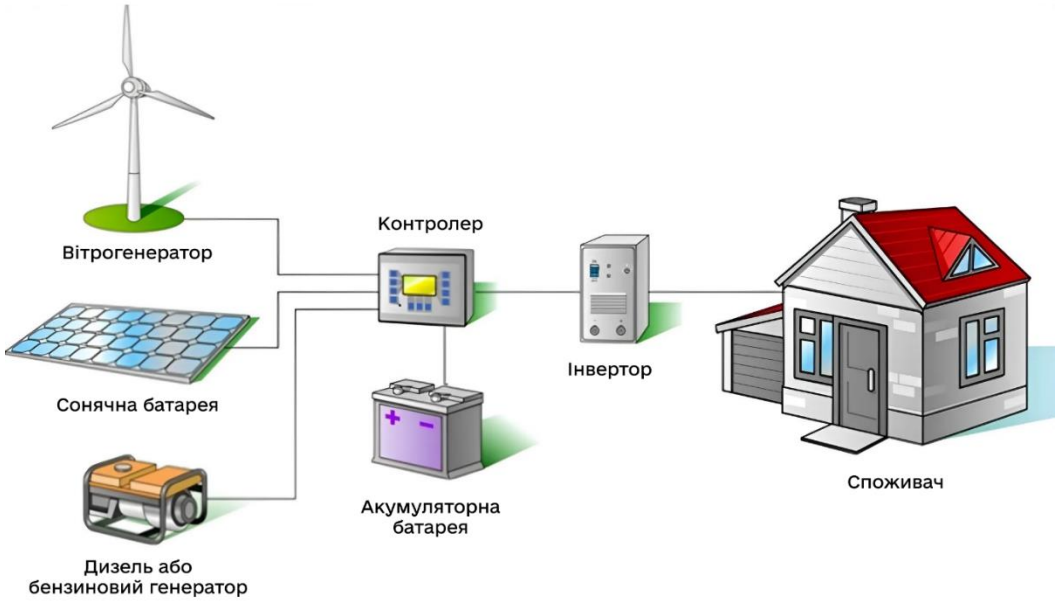


Рис. 1.4. Схема комбінованої системи електропостачання домогосподарства з СЕС, ВЕУ та акумулятором

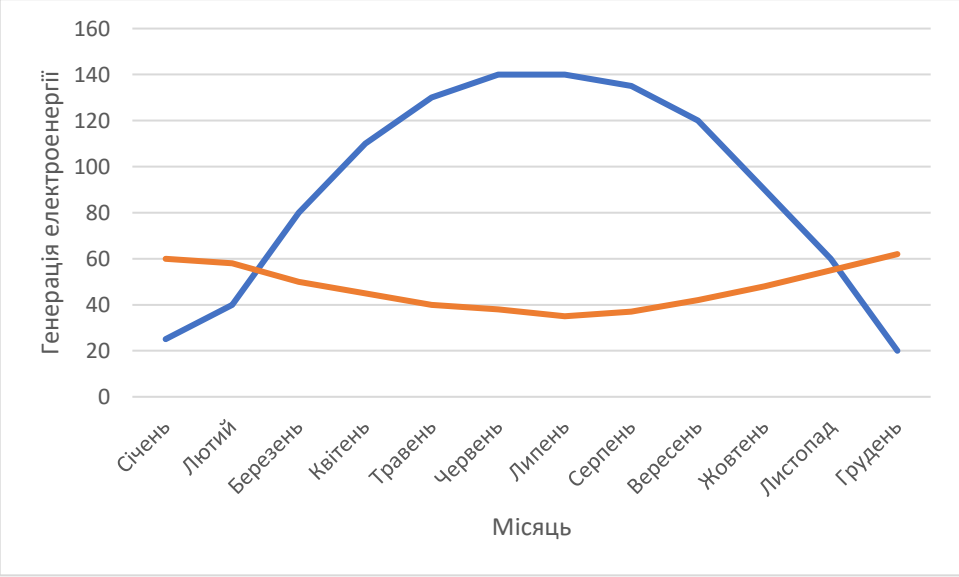


Рис. 1.5. Комбіновані системи електропостачання: переваги та недоліки

Комбіновані системи можуть працювати в різних режимах:

Автономний режим — повна незалежність від зовнішньої мережі, потребує потужної акумуляторної системи.

Гібридний режим — поєднання генерації з ВДЕ та мережевого живлення, з можливістю продажу надлишкової енергії.

Резервний режим — використання генераторів або акумуляторів лише у випадку відключення основного джерела.

На рисунку 1.5 наведено порівняльну сезонну генерацію СЕС і ВЕУ. Як видно, сонячна генерація досягає максимуму в літні місяці, тоді як вітрова — взимку. Це дозволяє сформувати стабільний енергетичний баланс протягом року, що є ключовою перевагою комбінованих систем.

Ключові переваги комбінованих систем наведено в таблиці нижче:

Таблиця 1.3

Порівняння переваг та недоліків комбінованих систем

Ознака	Переваги	Недоліки
Надійність	Забезпечення живлення при відмові одного з джерел	Складність синхронізації джерел
Енергоефективність	Оптимальне використання ресурсів залежно від погодних умов	Втрати при перетворенні та зберіганні енергії
Екологічність	Зниження викидів CO_2, використання чистої енергії	Вплив на ландшафт, шумове забруднення (для ВЕУ)
Економічна доцільність	Зменшення витрат на електроенергію у довгостроковій перспективі	Високі початкові інвестиції
Гнучкість конфігурації	Можливість адаптації до потреб споживача	Необхідність складного проєктування та моделювання

Важливим аспектом є інтеграція систем накопичення енергії (акумуляторів), які дозволяють зберігати надлишкову енергію та використовувати її в періоди низької генерації. Також необхідна система управління, що координує роботу всіх елементів,

забезпечує баланс між генерацією та споживанням, а також захист від перевантажень і збоїв.

За даними Інституту відновлюваної енергетики НАН України, комбіновані системи демонструють найвищу ефективність у домогосподарствах із середнім рівнем споживання (до 10 кВт·год/добу), особливо в регіонах із вираженою сезонністю клімату. Водночас, для промислових об'єктів або багатоквартирних будинків необхідне масштабування системи та додаткові інженерні рішення [8].

Таким чином, комбіновані системи електропостачання є перспективним напрямом розвитку енергетичної автономії домогосподарств. Вони дозволяють досягти балансу між надійністю, екологічністю та економічною ефективністю, хоча потребують ретельного проєктування, інвестицій та технічного супроводу.

1.4 Аналіз ринку обладнання для вітро- та сонячної енергетики в Україні

Ринок обладнання для відновлюваної енергетики в Україні, зокрема сонячної та вітрової, демонструє динамічний розвиток, попри складні геополітичні умови та виклики, пов'язані з безпекою, логістикою та доступністю інвестицій. У 2024 році, за даними Асоціації сонячної енергетики України, загальна потужність сонячних електростанцій зросла на понад 850 МВт, що свідчить про стабільний попит на відповідне обладнання, особливо з боку домогосподарств та малого бізнесу [9].

Сонячна енергетика залишається найбільш доступною та популярною формою ВДЕ для приватного сектора. Це пояснюється відносною простотою монтажу, широким вибором обладнання на ринку, а також наявністю локальних постачальників, які пропонують рішення «під ключ». Найбільш поширеними є монокристалічні сонячні панелі, які забезпечують високий коефіцієнт корисної дії (до 22%) та мають тривалий термін експлуатації. Водночас, на ринку присутні й тонкоплівкові модулі, які, хоча й поступаються за ефективністю, мають нижчу вартість і кращу гнучкість у монтажі. За даними [27], ефективність гібридних фотоелектричних систем із накопичувачами енергії значно зростає при правильному підборі інверторного обладнання, що дозволяє зменшити втрати при передачі та зберіганні енергії.

Таблиця 1.4

Основні типи сонячних панелей на українському ринку

Тип панелі	ККД, %	Термін служби, років	Середня ціна, грн	Особливості
Монокристалічна	19-22	25-30	14000-18000	Висока ефективність, компактність
Полікристалічна	16-18	20-25	11000-14000	Дешевші, менш ефективні
Тонкоплівкова (CdTe)	10-13	15-20	9000-12000	Гнучкі, легкі, дешевші

На ринку України активно працюють як імпортні бренди (JA Solar, Longi, Trina Solar, Canadian Solar), так і локальні виробники, що здійснюють збірку модулів на основі імпортованих елементів. Важливу роль відіграють інвертори — пристрої, що перетворюють постійний струм у змінний. Найбільш популярними є моделі Huawei, Solis, Fronius, Victron, які мають широкий функціонал, включаючи моніторинг, захист та інтеграцію з акумуляторами.

Щодо вітрової енергетики, ринок обладнання є менш розвиненим, але демонструє поступове зростання. Основними бар'єрами залишаються складність монтажу, потреба у високих баштах, а також нормативні обмеження щодо розміщення ВЕУ. Водночас, у регіонах із високим вітровим потенціалом (Одеська, Миколаївська, Херсонська області) спостерігається зростання інтересу до малопотужних вітроустановок (до 10 кВт), які використовуються для резервного живлення або в складі гібридних систем. У роботі [36] досліджено технічні рішення для кіберзахисту енергосистем з інтегрованими ВДЕ, що є актуальним при впровадженні смарт-контролерів у вітрові установки.

На українському ринку представлені вітроустановки таких брендів, як Eocycle, Bergey, Aeolos, а також окремі моделі китайського виробництва. Вітроагрегати малої потужності зазвичай мають вертикальну або горизонтальну вісь обертання, залежно від умов експлуатації. Вартість комплекту обладнання для ВЕУ потужністю 5 кВт становить від 120 000 до 180 000 грн, залежно від типу ротора, генератора та системи керування.

Загалом, ринок обладнання для ВДЕ в Україні характеризується такими тенденціями:

Зростанням попиту на автономні рішення — особливо в умовах нестабільного електропостачання.

Переорієнтацією на самоспоживання — більшість нових СЕС встановлюються без «зеленого тарифу».

Інтеграцією акумуляторних систем — зростає попит на літій-залізо-фосфатні батареї ($LiFePO_4$).

Появою нових технологій — зокрема перовскітних панелей та інтелектуальних інверторів [10].

Ринок обладнання для сонячної та вітрової енергетики в Україні демонструє стійке зростання, адаптуючись до нових викликів та потреб споживачів. Його розвиток є ключовим фактором для забезпечення енергетичної незалежності домогосподарств та сталого переходу до низьковуглецевої економіки.

Станом на 2025 рік український ринок обладнання для відновлюваної енергетики представлений широким спектром продукції як вітчизняного, так і імпортного виробництва. Найбільш популярними є монокристалічні сонячні панелі, інвертори з функцією гібридного перемикання.

Таблиця 1.5

Найбільш поширені моделі сонячних панелей

Модель	Потужність, Вт	ККД, %	Гарантія	Особливість
Longi Solar LR5-72HTH-585M	585	21,8	12 років на виріб, 25 років на вихід потужності	підходить для великих систем, має низький температурний коефіцієнт
Canadian Solar CS6R-440T (TOPCon)	440	N-type, підвищена ефективність при низькому освітленн	до 25 років	оптимальна для гібридних систем з обмеженим простором
JA Solar JAM72S30-540/MR	540	до 21	до 25 років	стабільна робота при розсіяному світлі

Таблиця 1.6

Інверторів для гібридних систем найбільш поширені

Модель	Тип	Напруга	Особливість
Growatt SPF 5000 ES	гібридний, з підтримкою АКБ	48 В	має вбудований MPPT-контролер, Wi-Fi-моніторинг, підтримує паралельну роботу
Victron Multiplus-II 48/5000/70-50	інвертор + зарядний пристрій		гнучке налаштування логіки перемикання, інтеграція з BMS, підтримка VRM-платформи
Huawei SUN2000-5KTL-L1	мережевий з можливістю підключення акумуляторів		висока ефективність, інтелектуальне управління, сумісність з системами «розумного будинку»

Таблиця 1.7

Для вітроелектричних установок побутового рівня популярними є моделі

Модель	Тип	Особливість
Tumo-Int 1.5kW 48V	горизонтальна вісь, 3 лопаті	низький поріг запуску (2,5 м/с), підходить для домогосподарств
Air Silent X 1kW	вертикальна вісь	безшумна робота, компактність, ефективна при турбулентному вітрі

1.5. Нормативно-правова база щодо використання ВДЕ в домогосподарствах

Розвиток відновлюваної енергетики в Україні, зокрема на рівні домогосподарств, регулюється комплексом нормативно-правових актів, які охоплюють технічні, економічні, екологічні та адміністративні аспекти. У 2024 році, на тлі енергетичної кризи та зростання попиту на автономні джерела живлення, держава активізувала законодавчу діяльність у сфері ВДЕ, зокрема щодо стимулювання розподіленої генерації, спрощення процедур підключення та запровадження нових механізмів підтримки.

Ключовим документом, що визначає стратегічні орієнтири, є Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року (Розпорядження КМУ № 587-р від 25.06.2024), який передбачає збільшення частки ВДЕ у загальному енергобалансі до 27% та розвиток розподіленої генерації на рівні домогосподарств. У межах цього плану було затверджено Національний план дій з відновлюваної енергетики (Розпорядження КМУ № 761-р від 13.09.2024), що містить конкретні заходи щодо підтримки малих СЕС і ВЕУ, зокрема через податкові пільги та компенсаційні механізми [11].

Таблиця 1.8

Основні нормативні акти щодо ВДЕ в домогосподарствах

Назва документа	Номер / Дата	Сфера регулювання
Закон України «Про альтернативні джерела енергії»	№ 555-IV від 20.02.2003	Загальні принципи використання ВДЕ
Закон України «Про ринок електричної енергії»	№ 2019-VIII від 13.04.2017	Правила підключення, продажу надлишків
Розпорядження КМУ «Про затвердження НПЕК до 2030 року»	№ 587-р від 25.06.2024	Стратегія розвитку ВДЕ
Розпорядження КМУ «Про затвердження плану дій з ВДЕ»	№ 761-р від 13.09.2024	Заходи підтримки домогосподарств
Постанова НКРЕКП «Про порядок підключення генеруючих установок»	№ 1185 від 10.11.2022	Технічні умови для СЕС і ВЕУ
Закон України «Про енергетичну ефективність»	№ 2479-IX від 15.07.2022	Стимулювання модернізації будівель

Окрему увагу заслуговує механізм гарантій походження електроенергії, який був запроваджений у 2024 році відповідно до європейських директив. Він дозволяє підтверджувати, що електроенергія, вироблена домогосподарством, є «зеленою», що відкриває доступ до міжнародних сертифікатів та потенційних фінансових інструментів [12].

Також у 2023–2024 роках було спрощено процедуру підключення малих СЕС до мережі, зокрема через електронну реєстрацію, скорочення термінів розгляду заявок та зменшення вартості технічних умов. Водночас, механізм «зеленого тарифу» для нових об’єктів був фактично заморожений, а акцент зміщено на моделі самоспоживання та нет-метеринг, що дозволяє зменшити витрати на електроенергію без продажу надлишків.

У сфері вітрової енергетики нормативна база менш деталізована, проте загальні положення щодо підключення, безпеки та сертифікації обладнання регулюються тими ж актами, що й для СЕС. Додатково, у 2024 році було розроблено Стратегію розвитку розподіленої генерації до 2035 року, яка передбачає створення умов для

встановлення малих ВЕУ в приватному секторі, з урахуванням шумових, візуальних та екологічних обмежень.

Таким чином, нормативно-правова база щодо використання ВДЕ в домогосподарствах в Україні поступово адаптується до сучасних викликів, орієнтуючись на європейські стандарти, потреби населення та технічні реалії. Її подальше вдосконалення є необхідною умовою для сталого розвитку енергетичної автономії на рівні домогосподарств.

Висновки по розділу 1

У результаті аналізу встановлено, що нестабільність централізованого енергопостачання в Україні стимулює інтерес до автономних джерел живлення. Сонячна та вітрова енергія мають значний потенціал для забезпечення енергетичної незалежності домогосподарств, особливо в умовах сезонних коливань. Їхнє комбіноване використання дозволяє досягти стабільного енергозабезпечення та підвищити енергоефективність.

Ринок обладнання для ВДЕ поступово розвивається, зокрема в сегменті сонячної енергетики, тоді як вітрові установки залишаються менш поширеними. Водночас нормативна база адаптується до сучасних викликів, створюючи умови для впровадження комбінованих систем.

Важливу роль у впровадженні таких рішень відіграє грамотне техніко-економічне обґрунтування, що враховує не лише вартість обладнання, а й режим споживання, кліматичні умови та можливості інтеграції з існуючою інфраструктурою.

Поєднання технічного потенціалу, ринкових можливостей і нормативної підтримки формує підґрунтя для розвитку енергетичної автономії приватного сектору.

РОЗДІЛ 2
ПРОЄКТУВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1. Визначення енергетичних потреб домогосподарства

Проєктування комбінованої системи електропостачання передбачає насамперед визначення реальних енергетичних потреб об’єкта, що забезпечується. У даному випадку розглядається приватне домогосподарство, розташоване в місті Черкаси, для якого передбачається встановлення сонячної електростанції на даху будинку та вітроелектричної установки на подвір’ї. Враховуючи географічне розташування, кліматичні умови та тип забудови, об’єкт має сприятливі умови для впровадження комбінованої системи на основі ВДЕ.

Сонячна електростанція буде складатися фотоелектричних полів, орієнтованих на південь, але з різними кутами нахилу скатів. Відповідно до тривимірної моделі будинку, один скат має кут нахилу 10°, а другий — 47°, що дозволяє ефективно використовувати сонячне випромінювання протягом року. Площа першого скату становить 50,5 м², другого — 40,7 м², а загальна площа, доступна для монтажу панелей, дорівнює 91,2 м².

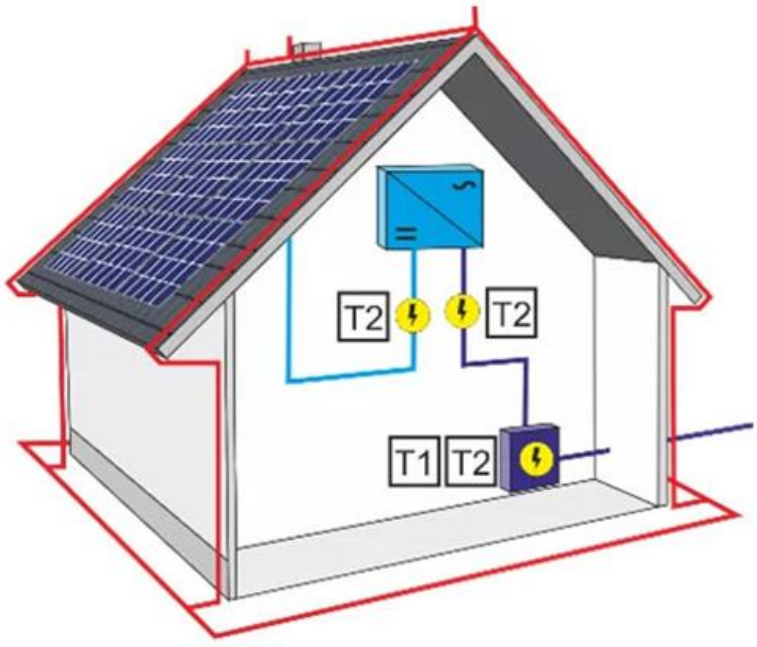


Рис.2.1. Тривимірна модель будинку з фотоелектричними полями

Для визначення енергетичних потреб домогосподарства було проведено аналіз усіх електроспоживачів змінного струму, з урахуванням їхньої номінальної потужності та середньої тривалості роботи протягом тижня. Результати розрахунків наведено в таблиці, яка охоплює освітлення, побутову техніку, комп'ютерну техніку, системи кондиціонування та інші пристрої.

Таблиця 2.1

Тижневе енергоспоживання електроприладів домогосподарства

№	Електроприлад	Потужність, кВт	Годин/тиждень	Споживання, кВт·Год/тиждень
1.	Світлодіодне освітлення (весь будинок)	0,2	70	14,0
2.	Холодильник	0,12	140	16,8
3.	Електричний бойлер	1,5	10	15,0
4.	Пральна машина	1,0	5	5,0
5.	Електрична духовка	2,0	3	6,0
6.	Комп'ютер+периферія	0,2	35	7,0
7.	Телевізор	0,1	30	3,0
8.	Тепловий насос (опалення)	2,5	8	20,0
9.	Зарядка електромобіля (домашня станція)	3,5	2	7,0
10.	Кухонні прилади	1,0	4	4,0
11.	Кондиціонер	1,2	6	7,2
12.	Сушарка для білизни	2,0	3	6,0
13.	Посудомийна машина	1,2	5	6,0
14.	Техніка для комфорту та прибирання	1,0	10	10,0

Загальне тижневе споживання електроенергії становить 127,0 кВт·год, що відповідає середньодобовому навантаженню близько 18,1 кВт·год. Цей показник є типовим для домогосподарства з чотирма мешканцями, стандартним набором побутової техніки та помірним рівнем електроспоживання. Водночас, у разі використання електричного опалення, теплового насоса або зарядки електромобіля, добове споживання може зрости до 20–25 кВт·год, що потребує відповідного масштабування системи генерації та накопичення.

На рисунках 2.2-2.7 представлене добове споживання за типами навантаження.

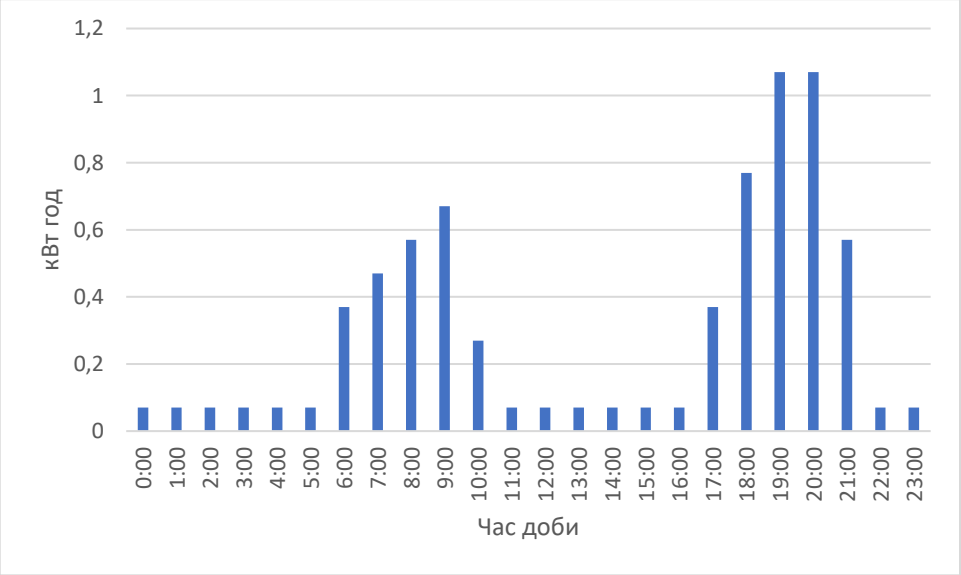


Рис. 2.2. Графіки розподілу спожитої потужності кухні та кухонних приладів

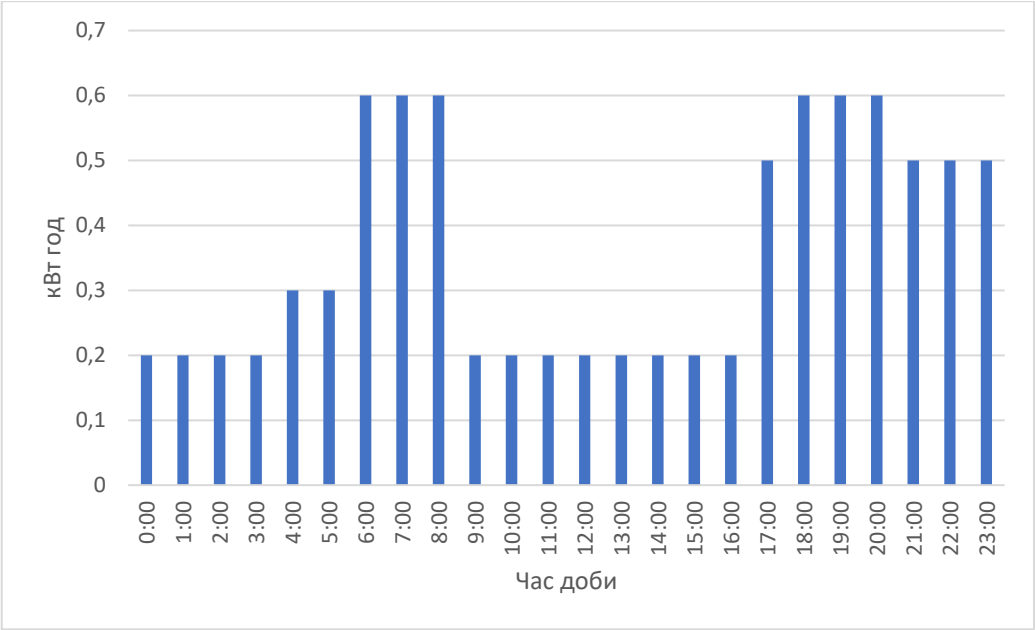


Рис. 2.3. Графіки розподілу спожитої потужності комфорту та прибирання

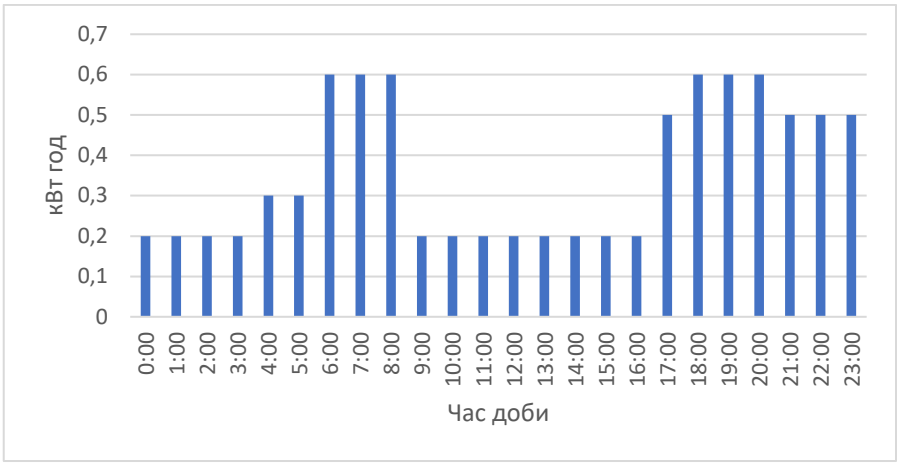


Рис. 2.4. Графіки розподілу спожитої потужності опалення та клімат

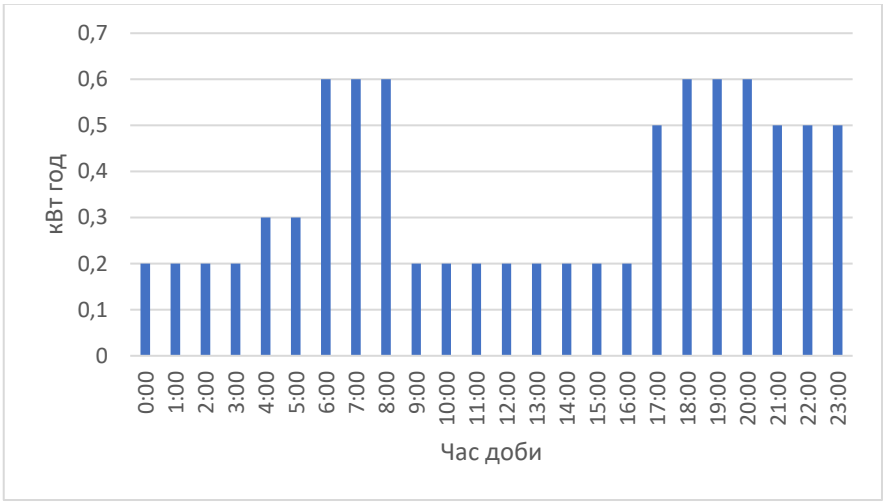


Рис. 2.5. Графіки розподілу спожитої потужності мультимедіа та робота

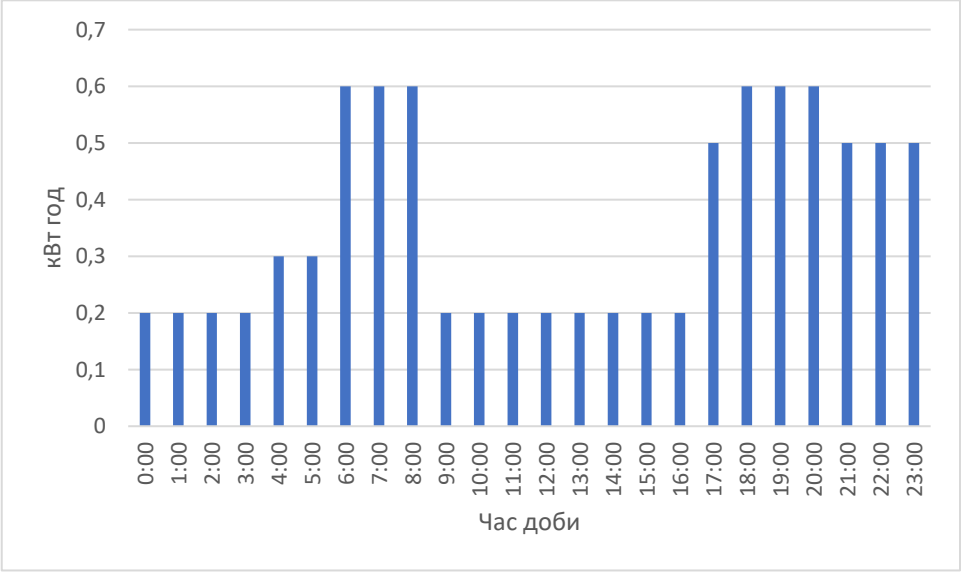


Рис. 2.6. Графіки розподілу спожитої потужності

транспорт

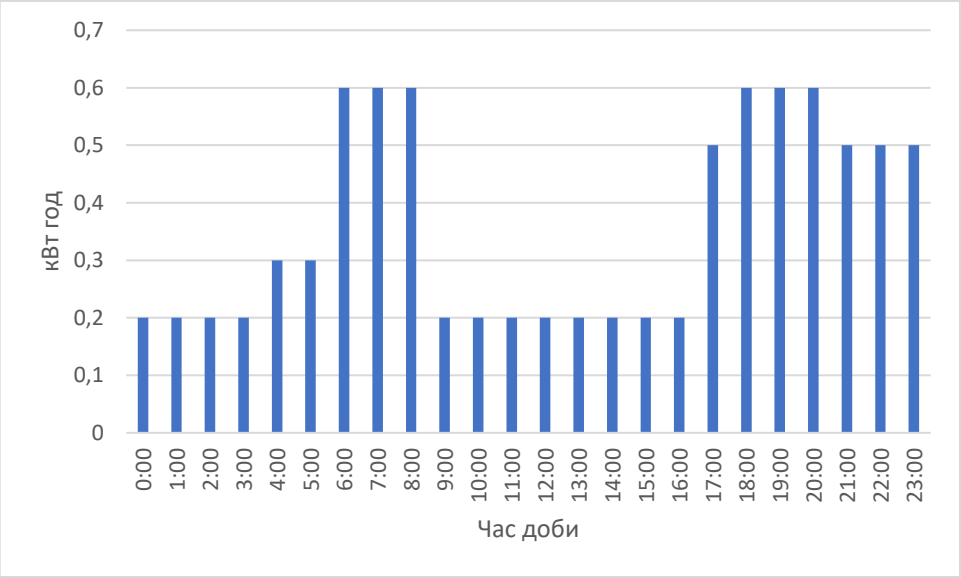


Рис. 2.7. Графіки розподілу спожитої потужності освітлення

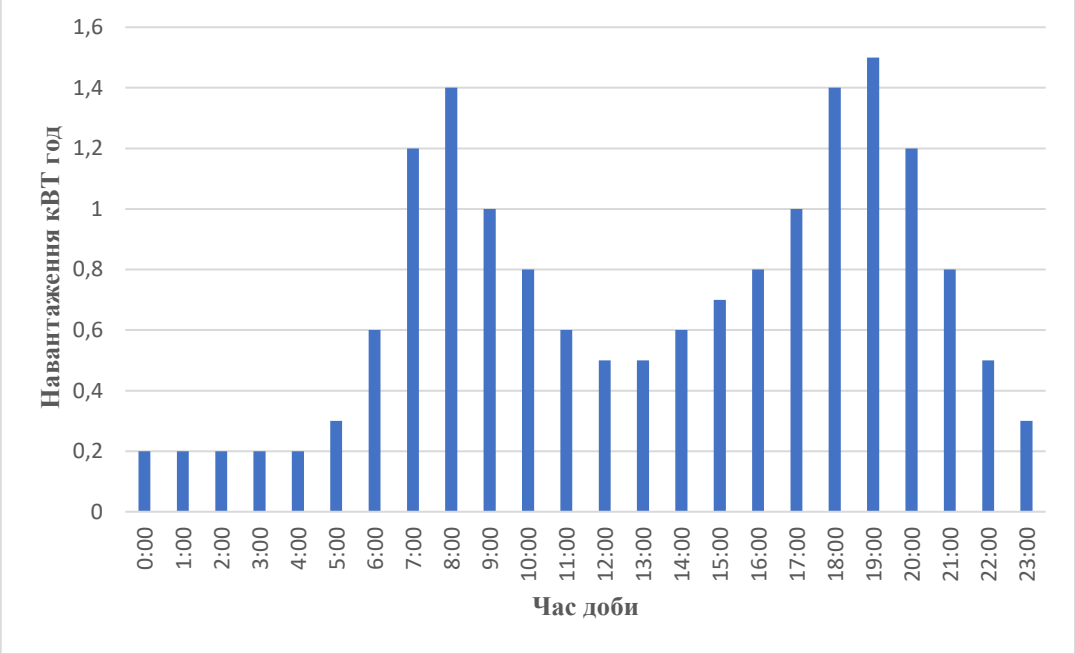


Рис. 2.8. Сумарна добова крива споживання електроенергії

Як видно з рисунка 2.8, протягом доби спостерігаються два виражені максимуми споживання електроенергії — у ранкові години (07:00–09:00) та у вечірній період (18:00–21:00). Це відповідає типовому побутовому режиму роботи електроприладів і має бути враховано при виборі конфігурації системи електропостачання. Це слід враховувати при виборі конфігурації системи, особливо щодо розміру акуму-

ляторного блоку та режимів роботи інвертора. Крім того, сезонні коливання продуктивності СЕС і ВЕУ вимагають адаптивного підходу до балансування генерації та споживання.

Визначення енергетичних потреб домогосподарства є ключовим етапом проєктування комбінованої системи електропостачання. Воно дозволяє обґрунтовано підібрати типи обладнання, розрахувати необхідну потужність генераторів, обсяг накопичення та забезпечити стабільну роботу системи в реальних умовах експлуатації.

2.2. Вибір конфігурації системи: автономна, гібридна або мережева

На основі аналізу добового графіка навантаження рис. 2.8 та розподілу спожитої потужності за типами електроприладів рис. 2.2–2.7, можна зробити висновок про характер енергоспоживання домогосподарства. Середньодобове навантаження становить близько 18,1 кВт·год, при цьому спостерігаються два виражені піки — у ранкові години (07:00–09:00) та у вечірній період (18:00–21:00). Такий режим є типовим для побутових об’єктів, де електроенергія використовується для приготування їжі, роботи мультимедійної техніки, опалення, кондиціонування, зарядки електромобіля та забезпечення комфортних умов проживання.

Враховуючи наявність теплового насоса, електричного бойлера, кондиціонера, сушарки, посудомийної машини, а також зарядної станції для електромобіля, можна стверджувати, що домогосподарство має підвищене навантаження у вечірній час, а також потребує стабільного живлення в нічний період. Це створює додаткові вимоги до системи електропостачання, зокрема щодо забезпечення резерву потужності, гнучкого управління навантаженням та можливості накопичення енергії.

З урахуванням зазначених факторів, доцільним є вибір гібридної конфігурації системи електропостачання, яка поєднує можливості автономної роботи та підключення до централізованої мережі. Така система дозволяє використовувати енергію від фотоелектричних модулів у денний час, накопичувати її в акумуляторних батареях, а також компенсувати дефіцит потужності за рахунок мережі у вечірній період. Крім

того, гібридна система забезпечує резервне живлення у випадку аварійних відключень, що особливо актуально для регіонів з нестабільною енергетичною ситуацією. Схематичне зображення принципу роботи гібридної системи електропостачання наведено на рисунку 2.9. Як видно, система поєднує декілька джерел енергії — сонячні модулі, вітрогенератор, резервний генератор — та забезпечує живлення споживача через інвертор, з можливістю накопичення енергії в акумуляторних батареях і підключення до зовнішньої електромережі.

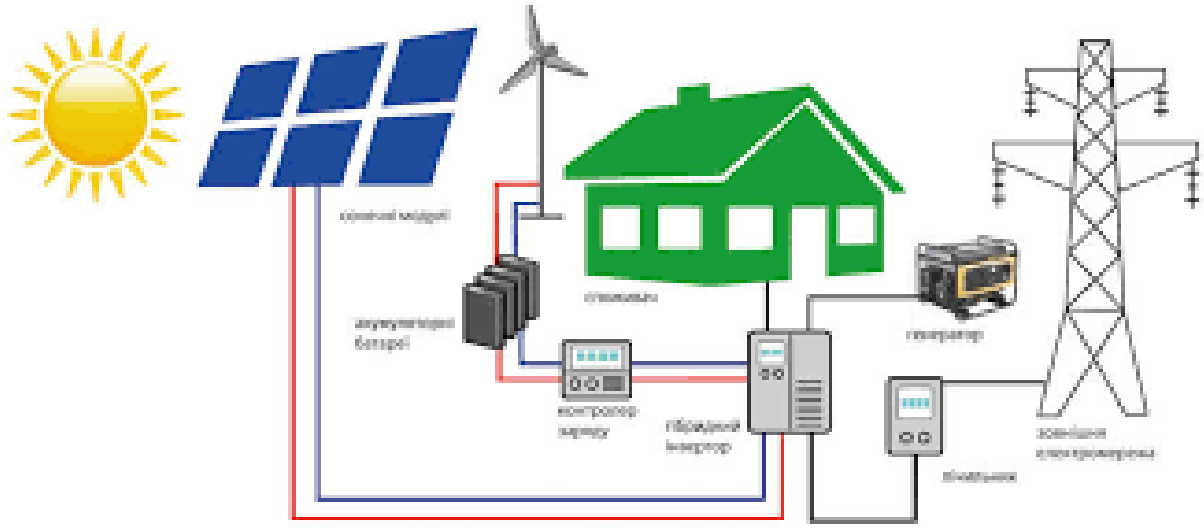


Рис. 2.9. Схема гібридної системи електропостачання

Таблиця 2.2

Порівняння конфігурацій систем електропостачання

Параметр	Автономна система	Мережева система	Гібридна система
Джерело живлення	ВДЕ+АКБ	Мережа+СЕС	ВДЕ+АКБ+мережа/генератор
Енергетична незалежність	висока	низька	висока
Стійкість до аварій	висока	низька	висока
Початкові витрати	високі	середні	високі
Можливість продажу енергії	немає	є	є

Продовження таблиці 2.2

Гнучкість конфігурації	обмежена	обмежена	висока
Оптимізація споживання	складна	автоматична	інтелектуальна
Резервне живлення	АКБ	відсутнє	АКБ+генератор/мережа

На відміну від мережевої конфігурації, яка не передбачає накопичення енергії і є залежною від зовнішнього джерела, гібридна система дозволяє досягти часткової енергонезалежності та оптимізувати витрати на електроенергію. Водночас повністю автономна система (off-grid) потребує значно більших капіталовкладень, зокрема у високопродуктивні акумулятори та резервні джерела живлення, що не завжди є економічно доцільним для побутового об’єкта. Для прийняття рішення щодо конфігурації системи використано порівняльний аналіз, представлений у Додатку Б. Характеристика обраного обладнання наведена в додатку В.

Гібридна система електропостачання є оптимальним рішенням для даного домогосподарства, оскільки забезпечує баланс між енергонезалежністю, економічністю та технічною гнучкістю. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку розподіленої генерації та інтеграції відновлюваних джерел енергії у побутовий сектор.

2.3 Розрахунок потужності сонячної електростанції (СЕС)

Для забезпечення енергоспоживання домогосподарства за гібридною схемою електропостачання необхідно визначити оптимальну встановлену потужність фотоелектричної станції. Розрахунок базується на середньодобовому споживанні електроенергії, кліматичних умовах регіону, ефективності обладнання та сезонних коливаннях інсоляції.

Середньодобове навантаження домогосподарства становить 18,1 кВт·год, що відповідає тижневому споживанню на рівні ≈127 кВт·год. Для компенсації цього обсягу електроенергії за рахунок СЕС необхідно врахувати середню кількість сонячних

годин на добу в місті Кривий Ріг Дніпропетровської області, яка становить ≈3,5–4,2 год/добу у весняно-літній період та ≈1,5–2,5 год/добу у зимовий період.

Ефективність фотоелектричних модулів залежить не лише від типу матеріалу, а й від умов освітлення та ступеня деградації. За результатами експериментального дослідження , відновлені модулі можуть демонструвати до 85% продуктивності порівняно з новими, що слід враховувати при виборі обладнання для домогосподарства.

Встановлена потужність СЕС визначається за формулою:

$$P_{\text{СЕС}} = \frac{E_{\text{ДОБ}}}{H_{\text{серед}} \cdot \eta \cdot K_{\text{втрат}}} \tag{2.1}$$

де

$E_{\text{ДОБ}}$ — середньодобове споживання електроенергії, кВт·год;

$H_{\text{серед}}$ — середня кількість сонячних годин на добу, год;

η — ефективність фотоелектричних модулів (≈0,18–0,20);

$K_{\text{втрат}}$— коефіцієнт втрат системи (≈0,75–0,85).

Підставимо значення у формулу (1) для весняно-літнього періоду:

$$P_{\text{СЕС}} = \frac{18{,}1}{4{,}0 \cdot 0{,}18 \cdot 0{,}8} = 31{,}4 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

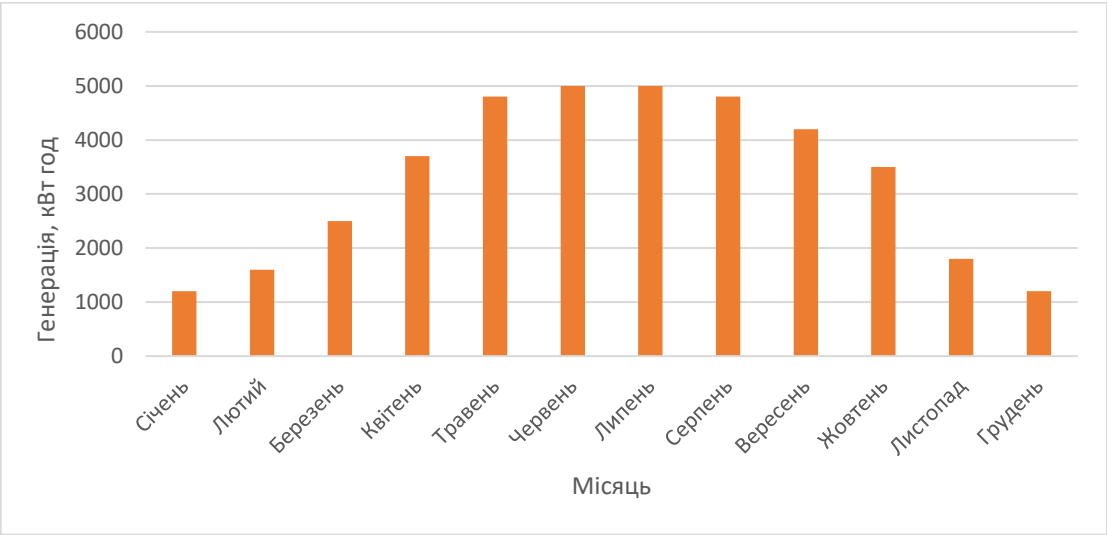


Рис. 2.9. Сезонна генерація електроенергії сонячною електростанцією

На рисунку 2.9 наведено приклад сезонної генерації електроенергії сонячною електростанцією. Як видно, у весняно-літній період виробіток сягає максимальних значень, що дозволяє повністю покривати добове навантаження домогосподарства. Водночас у зимові місяці генерація суттєво знижується, що обумовлює необхідність використання акумуляторних батарей або резервного джерела живлення.

Отже, для забезпечення добового навантаження у сприятливих умовах необхідна встановлена потужність СЕС ≈30–32 кВт. У зимовий період, за меншою кількістю сонячних годин, ця потужність може забезпечити лише часткове покриття навантаження, тому доцільно передбачити акумуляторні батареї та резервне джерело живлення (генератор або мережу).

У разі використання двосторонніх модулів, трекерів або оптимізаторів потужності, ефективність системи може бути підвищена до 20–22%, що дозволяє зменшити необхідну встановлену потужність до ≈26–28 кВт.

Вибір конкретної конфігурації СЕС залежить від доступної площі для монтажу, бюджету, режиму роботи домогосподарства та цілей енергонезалежності. У подальших розділах буде виконано розрахунок кількості модулів, інверторів та акумуляторів, необхідних для реалізації даної системи.

2.4 Розрахунок параметрів вітроелектричної установки (ВЕУ)

Для підвищення енергонезалежності домогосподарства та компенсації дефіциту генерації у нічний і зимовий періоди доцільно передбачити встановлення вітроелектричної установки (ВЕУ) як додаткового джерела живлення. ВЕУ може ефективно працювати за наявності стабільного вітрового режиму, особливо у відкритих місцевостях, де середня швидкість вітру перевищує 3–4 м/с. Згідно з дослідженнями, оптимальна робота ВЕУ досягається при встановленні на висоті понад 10 метрів, що дозволяє мінімізувати турбулентність та підвищити коефіцієнт використання потужності.

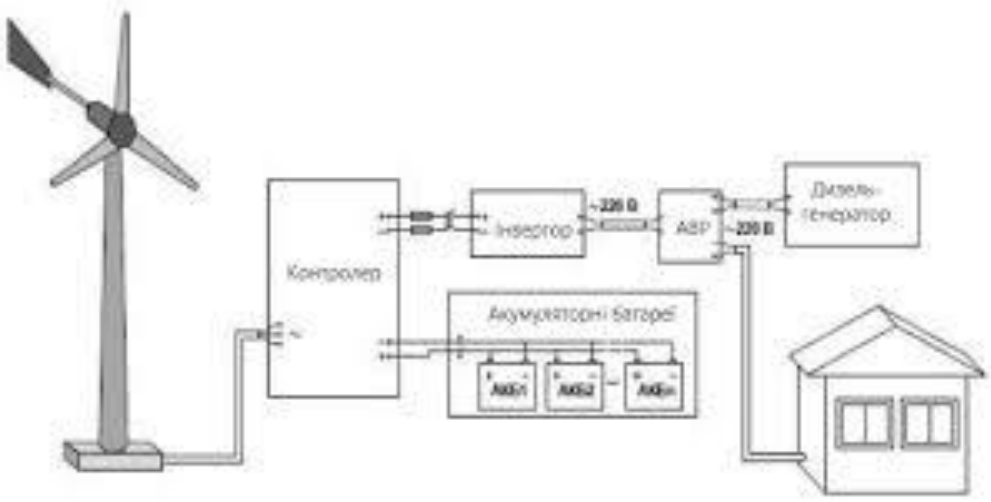


Рис.2.10. Схема роботи вітроелектричної установки у складі гібридної системи електропостачання

Потужність ВЕУ визначається за формулою:

$$P_{\text{ВЕУ}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot K \tag{2.2}$$

Де:

ρ — густина повітря (≈1,225 кг/м³);

A — площа ротора, м²;

V — середня швидкість вітру, м/с;

C_p — коефіцієнт корисної дії ротора (≈0,35);

K — коефіцієнт системних втрат (≈0,9).

Для побутового застосування зазвичай використовуються установки з діаметром ротора 2–5 м, що відповідає площі ≈3,14–19,6 м². За середньої швидкості вітру 4,5 м/с, можна оцінити потужність ВЕУ з ротором діаметром 3 м за формулою (2):

$$A = \pi \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^2 \approx 7{,}07 \text{ м}^2$$

$$P_{\text{ВЕУ}} = \frac{1}{2} \cdot 1{,}225 \cdot 7{,}07 \cdot (4{,}3)^3 \cdot 0{,}35 \cdot 0{,}9 \approx 0{,}88 \text{ кВт}$$

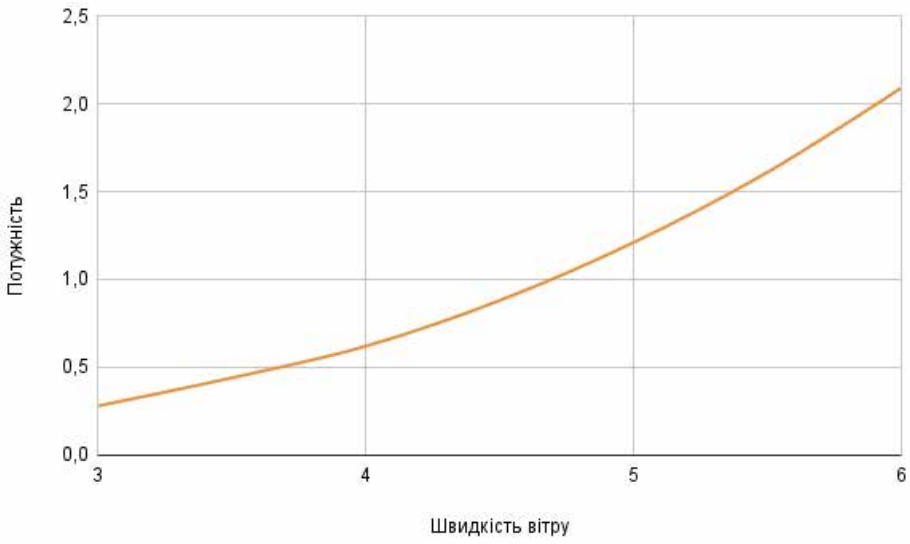


Рис.2.11. Залежність потужності ВЕУ від швидкості вітру

Таким чином, побутова ВЕУ з ротором діаметром 3 м може забезпечити ≈0,9 кВт номінальної потужності, що дозволяє частково покривати нічне навантаження або заряджати акумулятори. За умови роботи протягом 8 годин на добу, добова генерація становитиме:

$$E_{\text{ДОБ}} = 0{,}88 \cdot 8 \approx 7{,}00 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Це відповідає ≈38% добового навантаження домогосподарства, що є суттєвим внеском у загальний енергетичний баланс.

Вибір конкретної моделі ВЕУ залежить від вітрових умов, доступної площі для монтажу, рівня шуму, типу генератора (асинхронний, синхронний, постійного струму) та можливості інтеграції з інвертором гібридної системи.

Ефективність роботи ВЕУ значною мірою залежить від погодинного профілю вітру, що слід враховувати при моделюванні генерації та виборі типу ротора. Інтеграція ВЕУ з накопичувачем енергії дозволяє підвищити загальний ККД системи та забезпечити гнучке управління навантаженням у нічний період.

2.5 Вибір типу та параметрів акумуляторної системи

Акумуляторна система є ключовим елементом гібридної енергетичної установки, оскільки забезпечує накопичення електроенергії, її використання у періоди низької генерації (ніч, похмурі дні, зима), а також резервне живлення у випадку аварійного відключення зовнішньої мережі. Вибір типу акумуляторів, їх ємності та конфігурації залежить від добового навантаження, режиму роботи системи, глибини розряду, напруги інвертора та бажаного рівня енергонезалежності.

У роботі [27] показано, що інтеграція накопичувача енергії в гібридну фотоелектричну систему дозволяє не лише забезпечити автономність, а й підвищити загальний ККД системи на 12–15% за рахунок оптимізації режимів заряджання та розряджання.

Для забезпечення стабільної роботи домогосподарства з добовим навантаженням ≈18,1 кВт·год доцільно передбачити акумуляторну систему, яка здатна забезпечити живлення протягом 8–12 годин без генерації. Розрахунок необхідної ємності виконується за формулою:

$$C_{\text{ак}} = \frac{E_{\text{рез}}}{U \cdot DOD \cdot \eta} \tag{2.3}$$

де

$E_{\text{рез}}$— резервна енергія, кВт·год (наприклад, 12 кВт·год);

U — номінальна напруга системи, В (наприклад, 48 В);

DOD — допустима глибина розряду (0,8 для $LiFePO_4$, 0,5 для AGM);

η — ефективність акумулятора (≈0,95).

Підставимо значення у формулу (3) для літій-залізо-фосфатних акумуляторів:

$$C_{\text{ак}} = \frac{12}{48 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}95} \approx 0{,}33 \text{ кВт} \cdot \text{год/В} = 330 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Таким чином, для забезпечення 12 кВт·год резерву при 48 В системі необхідна акумуляторна батарея ємністю ≈330 А·год. За потреби збільшення автономності до 18 кВт·год, ємність зростає до ≈500 А·год.

З урахуванням циклічності роботи, температурного режиму, безпеки та довговічності, доцільно обрати літій-залізо-фосфатні ($LiFePO_4$) акумулятори, які мають такі переваги:

– висока глибина розряду (до 80–90%)

– тривалий ресурс (до 6000 циклів)

– стабільна робота при температурних коливаннях

– низький рівень саморозряду

– можливість швидкого заряду та інтеграції з BMS

Для побутових систем також використовуються гелеві (GEL) та AGM акумулятори, однак вони мають меншу глибину розряду, більшу вагу та коротший термін служби, що обмежує їх застосування у високонавантажених системах.

У подальших розділах буде виконано компонування акумуляторної системи з урахуванням кількості модулів, конфігурації (послідовне/паралельне з'єднання), типу інвертора та режиму роботи системи.

2.6. Система управління та автоматика

Система управління та автоматика є ключовим елементом гібридної енергетичної установки, що забезпечує узгоджену роботу всіх джерел живлення — сонячної електростанції (СЕС), вітроелектричної установки (ВЕУ), акумуляторної батареї, резервного генератора та зовнішньої електромережі. Її основне призначення — забезпечити стабільне живлення споживачів, оптимізувати використання енергії, захистити обладнання та мінімізувати втручання користувача.

У сучасних побутових системах управління реалізується за допомогою інтелектуального контролера або вбудованої автоматики інвертора, яка виконує такі функції:

– Моніторинг генерації – система постійно відстежує виробіток СЕС та ВЕУ, порівнюючи його з поточним навантаженням. У сонячний день пріоритет надається СЕС, а при наявності вітру — ВЕУ працює паралельно, доповнюючи генерацію.

– Управління зарядом акумуляторів – контролер заряду регулює струм і напругу, запобігаючи глибокому розряду або перезаряду. У системах з літієвими акумуляторами інтегрується BMS (Battery Management System), яка контролює температуру, балансування елементів та стан здоров'я батареї.

– Пріоритетне перемикання джерел живлення – система автоматично перемикається між джерелами залежно від доступної енергії. Логіка перемикання може бути такою:

СЕС → ВЕУ → АКБ → Мережа → Генератор

У денний період — живлення від СЕС та ВЕУ

У вечірній період — живлення від АКБ

При низькому заряді АКБ — підключення мережі або запуск генератора

– Логіка роботи ВЕУ – на відміну від СЕС, ВЕУ не залежить від часу доби. Вона активується автоматично при досягненні порогової швидкості вітру (зазвичай 2,5–3 м/с). Якщо генерація достатня — енергія подається на навантаження або заряджає АКБ. У нічний період або взимку ВЕУ може бути єдиним джерелом генерації.

– Аварійне реагування – при перевантаженні, короткому замиканні або перегріві система автоматично відключає відповідні контури, подає сигнал на дисплей або мобільний додаток, а також може надіслати повідомлення користувачу.

– Інтелектуальне управління навантаженням – у системах з розумними реле або таймерами можна реалізувати сценарії, коли енергоємні прилади (бойлер, зарядка електромобіля) вмикаються лише при наявності надлишкової генерації.

– Візуалізація та дистанційний доступ – сучасні системи мають дисплеї, веб-інтерфейси або мобільні додатки (наприклад, Victron VRM, Growatt ShinePhone, Huawei FusionSolar), які дозволяють користувачу бачити поточний стан системи, історію генерації, рівень заряду АКБ, споживання тощо.

Приклад сценарію роботи системи управління:

07:00 — СЕС починає генерацію, контролер заряджає АКБ, живлення йде на споживачів

12:00 — надлишкова генерація, бойлер вмикається автоматично, заряджається електромобіль

19:00 — СЕС не генерує, система перемикається на АКБ

23:00 — рівень заряду падає нижче порогу, система підключає мережу або запускає генератор

03:00 — сильний вітер, ВЕУ генерує енергію, заряджає АКБ

03:30 — коротке замикання на лінії освітлення, реле відключає контур, подається сигнал на інтерфейс.

Рис. 2.12 Блок-схема логіки перемикання джерел живлення гібридної енергетичної установки

На рисунку 2.12 наведено блок-схему логіки перемикання джерел живлення у гібридній енергетичній системі. Система пріоритетно використовує енергію від СЕС та ВЕУ, за умови достатньої генерації. При зниженні рівня заряду акумуляторів або відсутності генерації, активується зовнішня мережа або резервний генератор. У випадку аварійної ситуації — система відключає навантаження та подає сигнал на інтерфейс користувача.

Типове обладнання для реалізації автоматики:

– Інвертор з вбудованим контролером (Victron Multiplus, Growatt SPF, Huawei SUN2000)

– Контролер заряду MPPT з програмованими режимами – BMS для літієвих АКБ (Daly, JBD, Victron Smart BMS)

– Автоматичні вимикачі DC/AC, реле контролю напруги

– Модулі моніторингу з Wi-Fi або GSM (ShineWiFi-X, SmartSolar, SolarAssistant).

Система управління та автоматика забезпечує інтелектуальну координацію всіх компонентів, підвищує ефективність роботи, захищає обладнання та створює комфортні умови для користувача. Її реалізація є обов'язковою умовою для стабільної роботи гібридної енергетичної системи.

Висновки до розділу 2

У даному розділі виконано техніко-економічне обґрунтування вибору джерел живлення для автономного електропостачання домогосподарства. На основі аналізу добового навантаження, сезонних коливань генерації та режимів споживання сформовано структуру гібридної енергетичної системи, яка включає сонячну електростанцію (СЕС), вітроелектричну установку (ВЕУ), акумуляторну батарею, резервний генератор та систему управління.

Розрахунки показали, що:

– СЕС є основним джерелом живлення у весняно-літній період, забезпечуючи до 100% добового навантаження при сприятливій інсоляції.

– ВЕУ доповнює СЕС у нічний та зимовий періоди, активується автоматично при наявності вітру, та здатна генерувати до 7 кВт·год на добу.

– Акумуляторна система забезпечує резервне живлення протягом 8–12 годин, рекомендовано використання літій-залізо-фосфатних акумуляторів ємністю 330–500 А·год при напрузі 48 В.

– Система управління та автоматика координує роботу всіх джерел, забезпечує захист обладнання, оптимізує споживання та дозволяє дистанційний моніторинг.

Обрана конфігурація дозволяє досягти високого рівня енергонезалежності, зменшити витрати на електроенергію, забезпечити стабільне живлення критичних навантажень та адаптувати систему до реальних умов експлуатації.

РОЗДІЛ 3
МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РОБОТИ СИСТЕМИ

3.1. Вибір середовища для моделювання

Для якісного аналізу роботи комбінованої системи електропостачання домогосподарства необхідно обрати програмне середовище, яке дозволяє враховувати сезонні коливання генерації, змінні режими навантаження, логіку перемикання джерел живлення, а також економічні показники проєкту. Вибір середовища моделювання залежить від цілей дослідження, глибини технічного аналізу, доступності кліматичних даних та можливості інтеграції з реальними параметрами обладнання.

Одним із найбільш універсальних інструментів для технічного моделювання є MATLAB/Simulink. Це середовище дозволяє будувати структурні моделі системи з урахуванням динаміки роботи інверторів, контролерів заряду, акумуляторних батарей та джерел генерації. Завдяки блочній структурі Simulink можливо реалізувати алгоритми автоматичного керування, аналізувати перехідні процеси, моделювати аварійні режими та оцінювати стабільність системи. Однак для повноцінного моделювання енергетичного балансу протягом року MATLAB потребує зовнішнього підключення кліматичних даних, що ускладнює реалізацію сезонного аналізу без додаткових модулів. Крім того, складність інтерфейсу та потреба в ліцензії можуть обмежити його застосування в освітньо-професійних проєктах.

Для моделювання саме енергетичного балансу, оптимізації конфігурації системи та оцінки економічної ефективності доцільно використовувати HOMER Pro. Це спеціалізоване середовище, розроблене для проєктування автономних і гібридних енергетичних систем, яке має вбудовані бази кліматичних даних, включаючи сонячну інсоляцію, швидкість вітру, температуру та інші параметри. HOMER дозволяє задавати структуру системи, обирати типи обладнання, моделювати добове та сезонне навантаження, а також автоматично розраховувати періоди дефіциту, надлишку енергії, рівень використання акумуляторів і потребу в резервному живленні. Крім технічного моделювання, HOMER виконує економічний аналіз: розраховує капітальні

витрати, щорічну економію, термін окупності та можливий дохід від продажу надлишкової енергії за «зеленим» тарифом. Простота інтерфейсу, наявність демоверсії та орієнтація на побутові системи роблять HOMER оптимальним вибором для даної магістерської роботи.

Для моделювання сонячної генерації з урахуванням географічного розташування, орієнтації панелей, тіньових втрат та характеристик конкретних модулів може бути використане середовище PVSyst. Воно дозволяє виконати точний розрахунок продуктивності СЕС, обрати моделі панелей з каталогу виробників, оцінити втрати на інверторах та кабелях. Проте PVSyst не підтримує моделювання вітрових установок, акумуляторних систем та логіки перемикання джерел, тому його застосування доцільне лише як допоміжний інструмент для уточнення параметрів сонячної частини системи.

З урахуванням цілей дослідження, структури системи та необхідності поєднання технічного і економічного аналізу, основним середовищем моделювання обрано HOMER Pro. Його функціональні можливості дозволяють реалізувати погодинне моделювання генерації, оцінити ефективність гібридної конфігурації, визначити оптимальні параметри обладнання та обґрунтувати інвестиційну привабливість проєкту.

3.2. Побудова моделі комбінованої системи

Для моделювання роботи комбінованої системи енергозабезпечення було використано середовище Mathcad, яке дозволяє поєднати аналітичні розрахунки, логічні умови та графічну візуалізацію результатів. Модель враховує змінну генерацію, навантаження, рівень заряду АКБ (SOC) та реалізує логіку перемикання джерел живлення.

Вхідні параметри моделі:

$G(t)$ — генерація від СЕС/ВТ, кВт

$L(t)$ — навантаження, кВт

E_{max}— ємність АКБ, кВт·год

SOC_0 — початковий рівень заряду АКБ, %

Δt — часовий крок моделювання, год

SOC_{min}, SOC_{max} — порогові значення для перемикання режимів

Розрахунок балансу потужності:

$P(t) := G(t) - L(t)$

Оновлення рівня SOC:

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \frac{P(t) \cdot \Delta t}{E_{max}} \cdot 100 \qquad (2.4)$$

У Mathcad ця формула реалізована як рекурсивне визначення з умовним обмеженням на діапазон SOC.

Логіка перемикання джерел живлення:

У моделі реалізовано умовні оператори типу if:

Якщо $SOC(t) < SOC_{min}$→ живлення від резервного джерела

Якщо $SOC(t) > SOC_{max}$ → обмежується заряд АКБ

Якщо $G(t) > L(t)$ → надлишок спрямовується на заряд АКБ

Якщо $G(t) < L(t)$ → дифіцит покривається з АКБ або від резервного джерела

У Mathcad ці умови реалізовані через вкладені логічні вирази з використанням функцій if, otherwise та piecewise.

Візуалізація результатів:

У середовищі Mathcad побудовано графіки:

Зміни SOC протягом доби

Балансу потужності $P(t)$

Активного джерела живлення (умовна стрічка)

Ці графіки дозволяють візуально оцінити ефективність логіки перемикання та стабільність роботи системи.

Вхідні параметри моделювання живлення

Вхідні параметри визначають баланс потужності та режим живлення для кожної години.

	Потужності			Стан АКБ	
Година	Генерація G (кВт)	Навантаження L (кВт)	Баланс P (кВт)	SOC (%)	Джерело живлення
1	0.5	1.0	-0.50	40.0	АКБ → навантаження
2	1.2	1.0	0.20	44.0	СЕС → навантаження + АКБ
3	2.5	1.0	1.50	74.0	СЕС → навантаження + АКБ
4	3.0	1.0	2.00	95.0	СЕС → навантаження, АКБ не заряджається
5	2.0	1.0	1.00	95.0	СЕС → навантаження, АКБ не заряджається
6	1.0	1.0	0.00	95.0	Балансований режим
7	0.2	1.0	-0.80	79.0	АКБ → навантаження

1. SOC = рівень заряду АКБ
2. P = G − L

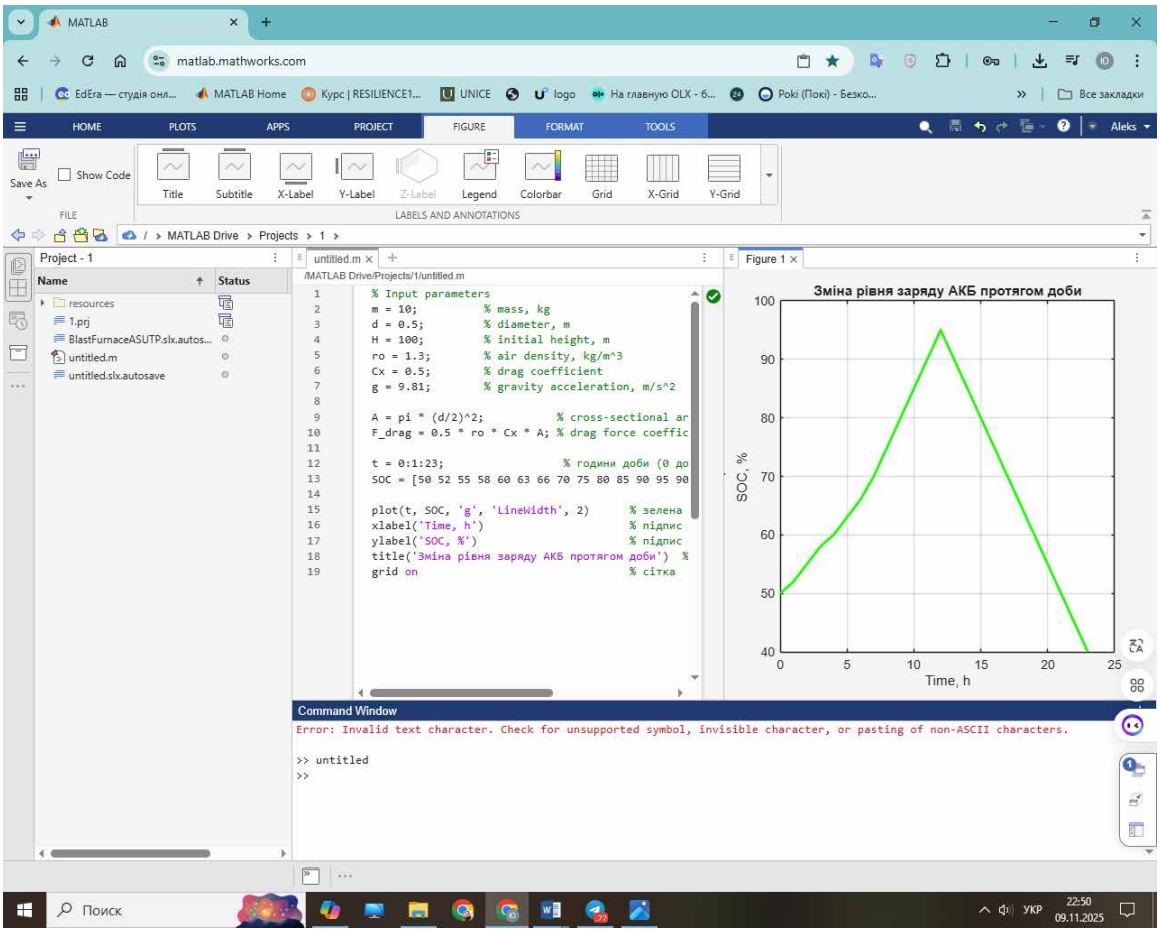


Рис. 3.1. Зміна рівня заряду акумуляторної батареї протягом доби

Графік ілюструє динаміку рівня заряду АКБ (SOC) у межах комбінованої системи енергозабезпечення. Заряд змінюється залежно від балансу між генерацією сонячної енергії та навантаженням споживача. У денні години SOC зростає завдяки генерації, а в нічні — знижується через споживання. Модель враховує порогові значення SOC та реалізує логіку перемикання між джерелами живлення: СЕС, АКБ та резерв.

3.3 Аналіз добової та сезонної генерації і споживання електроенергії

Ефективне функціонування автономної енергетичної системи в умовах захисної споруди залежить від здатності системи адаптуватися до добових та сезонних коливань генерації і споживання електроенергії. У межах даного дослідження було проведено моделювання типових профілів генерації від фотоелектричних панелей (ФЕП) та вітрових турбін, а також споживання енергії системами життєзабезпечення.

Добова генерація від ФЕП має чітко виражений синусоїдальний характер, з піковими значеннями у період з 10:00 до 15:00. Для моделювання використовувалась функція:

$$P_{CEC(t)} = A \cdot \sin\frac{2\pi t}{T} + B \tag{2.5}$$

де

A =1,5 кВт — амплітуда генерації;

B =0,5 кВт — зміщення для уникнення негативних значень;

T =86400 с — тривалість добового циклу.

Генерація від вітрової турбіни моделювалась як синусоїда з коротшим періодом, що імітує пориви вітру:

$$P_{BT(t)} = 0{,}8 \cdot \sin\frac{2\pi t}{43200} + 0{,}6$$

У межах моделювання енергетичного балансу автономної системи живлення було враховано типове добове споживання електроенергії для домогосподарства, що

складається з чотирьох осіб, розміщеного в захисній споруді. Споживання електроенергії включає:

Базове навантаження — постійне споживання, пов’язане з роботою систем вентиляції, освітлення, зарядки мобільних пристроїв, побутового ІТ-обладнання (ноутбуки, роутери), холодильника, а також підтримання температурного режиму.

Пікове навантаження — періоди активного використання електроприладів у ранкові (06:00–09:00) та вечірні (18:00–22:00) години, коли мешканці готують їжу, користуються побутовою технікою, заряджають акумулятори, тощо.

Аварійне навантаження — короткочасне вмикання резервних систем (наприклад, насосів, аварійного освітлення), яке моделюється окремо в сценаріях енергетичного дефіциту.

Для моделювання добового профілю споживання використано функцію:

$$P_{\text{спож}(t)} = P_{\text{баз}} + P_{\text{пік}(t)} \tag{2.6}$$

де

$P_{\text{баз}} = 1{,}2$ кВт — постійне навантаження;

$P_{\text{пік}(t)} = 0{,}5 \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{43200} - \frac{\pi}{2}\right)$ — пікове навантаження, що має два максимуми на добу.

Функція $P_{\text{пік}(t)}$ має два піки — вранці та ввечері — і нульове значення в середині дня та вночі. Це відповідає реальному ритму життя домогосподарства, де активне використання електроприладів припадає на періоди пробудження та підготовки до сну.

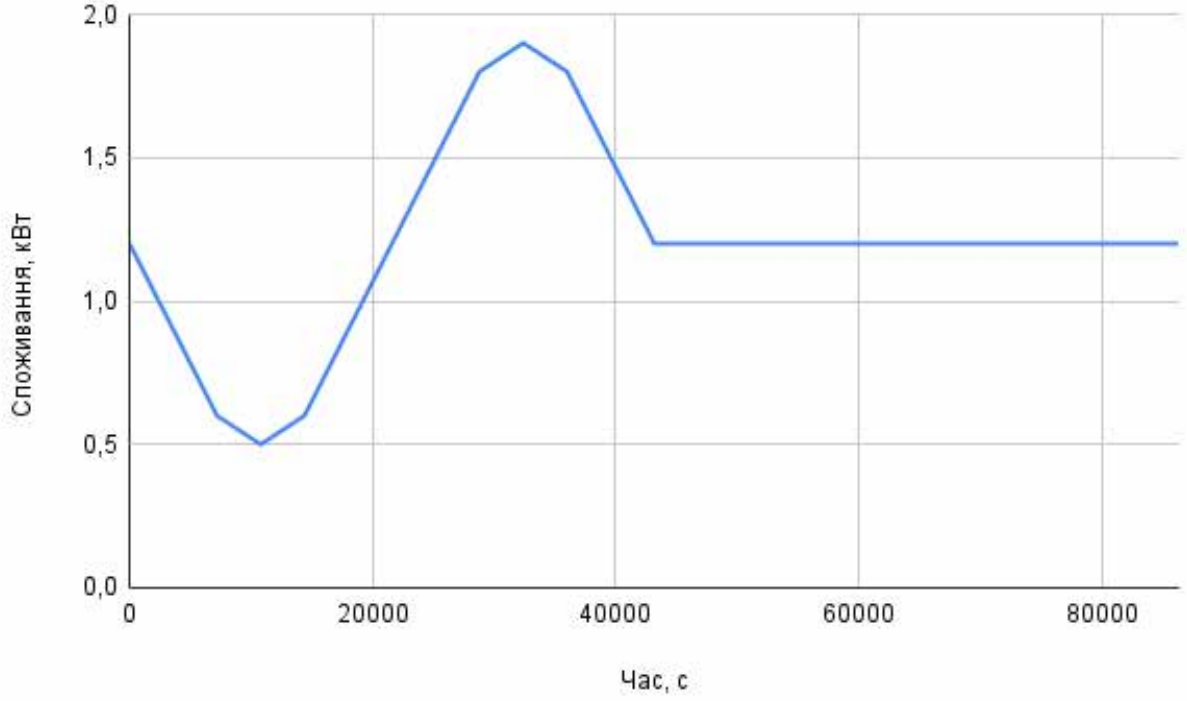


Рис.3.2. Графік добового споживання електроенергії домогосподарства

У таблиці 3.1 наведено числові значення споживання електроенергії з інтервалом 3 години.

Таблиця 3.1

Добове споживання інтервал 6 годин

Час доби	$P_{\text{баз}}$, кВт	$P_{\text{пік}(t)}$, кВт	Загальне споживання $P_{\text{спож}(t)}$, кВт
00:00	1,2	0,0	1,2
06:00	1,2	0,5	1,7
12:00	1,2	0,0	1,2
18:00	1,2	0,5	1,7
21:00	1,2	0,0	1,2

Загальне добове споживання становить приблизно 30–35 кВт·год, залежно від тривалості пікових періодів.

Таблиця 3.2

Порівняння добових профілів генерації та споживання

Час доби	Генерація СЕС, кВт	Генерація ВТ, кВт	Споживання, кВт	Баланс (Генераці-Споживання), кВт
00:00	0,5	0,6	1,2	-0,1
06:00	1,0	0,9	1,5	+0,4
12:00	2,0	0,6	1,3	+1,3
18:00	1,0	0,8	1,6	+0,2
23:00	0,6	0,7	1,2	+0,1

Позитивний баланс свідчить про накопичення енергії в АКБ, негативний — про її розряд.

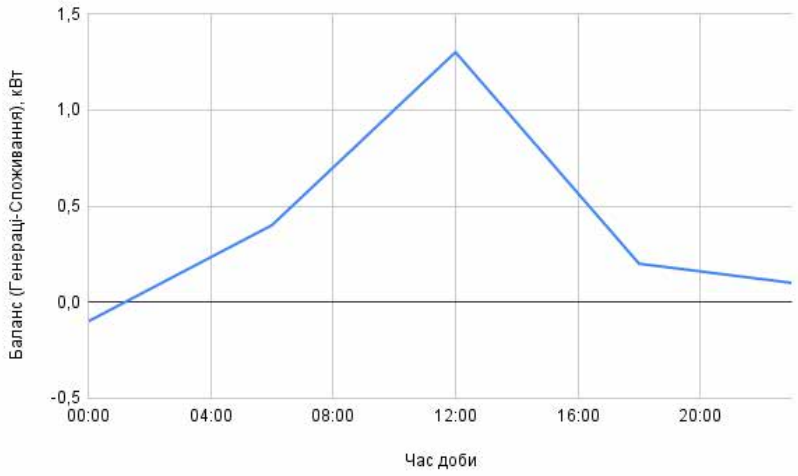


Рис.3.3.Графік добового енергетичного балансу домогосподарства (генерація – споживання)

Аналіз графіка добового балансу показує, що у період з 10:00 до 15:00 система має надлишок енергії, який може бути накопичений в АКБ. У вечірні та нічні години виникає дефіцит, що потребує перемикання на резервне джерело живлення або оптимізації навантаження.

Сезонні коливання генерації залежать від: тривалості світлового дня; інтенсивності сонячного випромінювання; середньої швидкості вітру.

Таблиця 3.3

Типові сезонні коефіцієнти генерації

Сезон	Коефіцієнт освітлення	Коефіцієнт вітру	Генерація СЕС, кВт·год/день	Генерація ВТ, кВт·год/день
Зима	0,4	0,9	4,8	10,2
Весна	0,7	0,8	8,4	9,6
Літо	1,0	0,6	12,0	7,2
Осінь	0,6	0,7	7,2	8,4

Споживання змінюється залежно від: температури (вентиляція/обігрів); тривалості перебування людей; освітлення.

Таблиця 3.4

Сезонна структура добового споживання електроенергії 5 домогосподарства

Сезон	$P_{\text{баз}}$, кВт	$P_{\text{пік}(t)}$, кВт	Загальне споживання $P_{\text{спож}(t)}$, кВт
Зима	18,0	6,0	24,0
Весна	16,0	4,0	20,0
Літо	14,0	3,0	17,0
Осінь	16,0	4,5	20,5

Таблиця 3.5

Баланс енергії за сезонами

Сезон	Генерація СЕС+ВТ, кВт·год/день	Загальне споживання	Баланс кВт·год/день
Зима	15,0	24,0	-9,0
Весна	18,0	20,0	-2,0
Літо	19,2	17,0	+2,2
Осінь	15,6	20,5	-4,9

Негативний баланс вказує на необхідність резервного джерела або оптимізації навантаження.

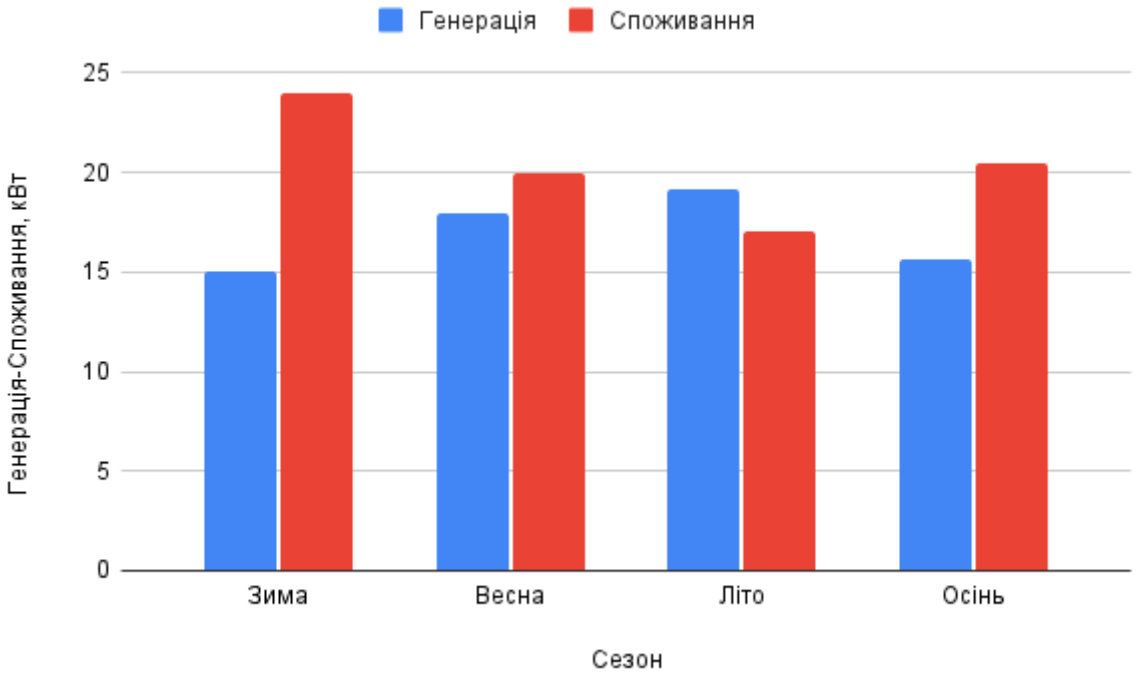


Рис. 3.4.Сезонне співвідношення генерації та споживання електроенергії

Рисунок 3.4. демонструє сезонне співвідношення генерації та споживання електроенергії домогосподарства з чотирьох осіб. У літній період генерація перевищує споживання, що дозволяє накопичувати енергію. В осінньо-зимовий період спостерігається дефіцит, що потребує резервного живлення або оптимізації навантаження.

Аналіз добової та сезонної генерації і споживання електроенергії дозволяє сформувати адаптивну стратегію управління енергетичними потоками. В умовах захисної споруди, де критично важлива автономність, необхідно враховувати:

добові піки генерації та споживання;

сезонні дефіцити енергії;

можливість накопичення та резервного живлення.

На основі отриманих даних буде реалізовано логіку перемикання джерел живлення, що дозволить забезпечити безперервну роботу систем життєзабезпечення

навіть у періоди енергетичного дефіциту. Графічні результати моделювання, що підтверджують ефективність логіки перемикання джерел живлення, наведено в Додатку А.

3.4 Логіка перемикання джерел живлення

Забезпечення енергетичної автономності домогосподарства в умовах нестабільної генерації вимагає реалізації гнучкої логіки перемикання джерел живлення. Така логіка дозволяє адаптувати роботу системи до змінних умов — добового та сезонного балансу, рівня заряду акумуляторної батареї (АКБ), наявності резервного джерела та пріоритетів навантаження.

У попередніх підпунктах було показано, що в літній період генерація перевищує споживання, тоді як в осінньо-зимовий період виникає дефіцит енергії. Добовий графік балансу демонструє, що у нічний час та в години пікового навантаження (06:00–09:00, 18:00–22:00) споживання перевищує генерацію, що створює потребу в накопиченні енергії або перемиканні на резервне джерело.

Логіка перемикання базується на таких принципах:

Прогнозування балансу – система оцінює поточне співвідношення генерації та споживання, а також прогнозує його на найближчі години.

Контроль заряду АКБ – рівень заряду визначає можливість автономної роботи або потребу в резервному живленні.

Пріоритетне навантаження – у разі дефіциту енергії система обмежує некритичні споживачі, зберігаючи живлення для життєво важливих систем.

Автоматичне перемикання – при досягненні критичних порогів система автоматично перемикається на резервне джерело або оптимізує навантаження.

Таблиця 3.6

Умови перемикання джерел живлення

Умова	Дія
$SOC_{\text{АКБ}} < 20\%$ і $P_{\text{Баланс}(t)} < 0$	Перемикання на резервне джерело
$SOC_{\text{АКБ}} > 80\%$ і $P_{\text{Баланс}(t)} < 0$	Заряд АКБ, живлення від СЕС/ВТ
$SOC_{\text{АКБ}} \in [20\%, 80\%]$	Робота в автономному режимі
Відсутність генерації > 6 годин	Перемикання на резервне джерело

SOC −state of charge, рівень заряду АКБ

Пороги заряду АКБ обрано з урахуванням типових характеристик літій-іонних батарей, де надмірне розрядження ($< 20\%$) призводить до деградації, а заряд понад 80% дозволяє зберігати запас для нічного споживання

У разі дефіциту енергії система переходить до режиму обмеження навантаження. Для цього споживачі класифікуються за критичністю:

Критичні споживачі: система вентиляції та фільтрації повітря, освітлення основних приміщень, холодильне обладнання, засоби зв’язку (Wi-Fi, мобільна зарядка)

Некритичні споживачі: побутова техніка (пральна машина, мікрохвильова піч), розважальні пристрої (телевізор, ноутбук), зарядка електроінструментів

У режимі дефіциту система автоматично вимикає некритичні споживачі, зберігаючи живлення для життєво важливих функцій.

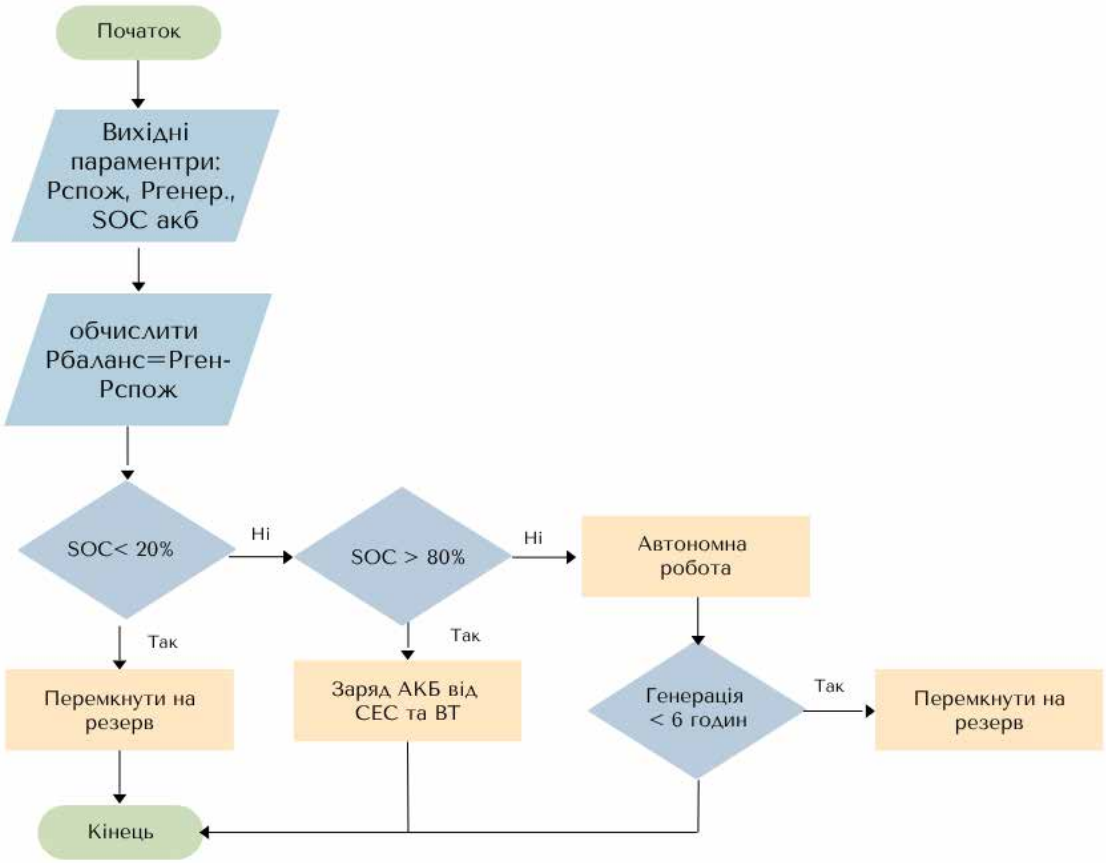


Рис. 3.5.Уточнена блок-схема логіки перемикання джерел живлення з урахуванням тривалості генерації

Схема демонструє, що навіть при нормальному рівні заряду АКБ, тривала відсутність генерації (>6 год) є критичним фактором, що ініціює перемикання на резервне джерело живлення.

Для оцінки ефективності добового режиму роботи системи було побудовано графік зміни рівня заряду акумуляторної батареї (SOC) у поєднанні з генерацією від сонячної електростанції (СЕС/ВТ) та режимом роботи АКБ.

Як видно з рисунка 3.4, у період активної генерації (червона лінія) SOC (зелена лінія) поступово зростає, досягаючи максимального рівня до 14:00. У вечірні та нічні години, коли генерація відсутня, АКБ (синя лінія) забезпечує живлення навантаження, що супроводжується поступовим зниженням SOC.

Така динаміка підтверджує доцільність обраної логіки перемикання джерел живлення та дозволяє обґрунтувати необхідність резервного джерела у випадку критичного зниження SOC.

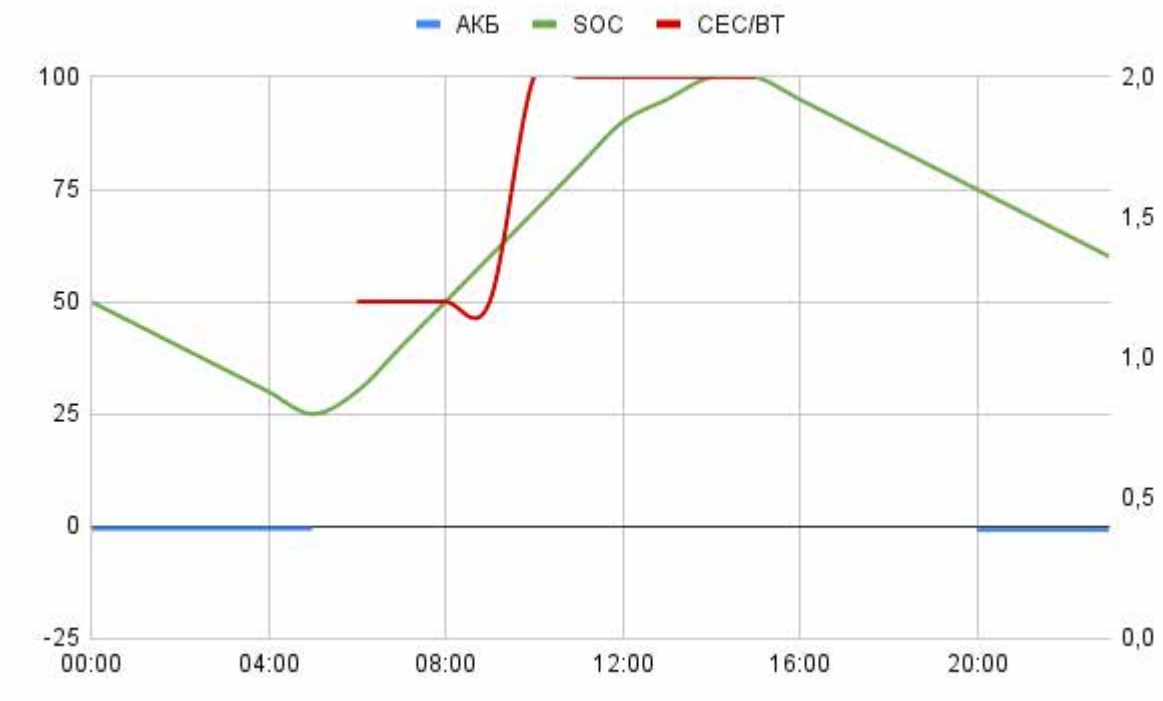


Рис. 3.6. Графік зміни рівня заряду АКБ (SOC), генерації СЕС/ВТ та режиму роботи АКБ протягом доби

Зелена лінія відображає рівень заряду АКБ (SOC), червона — генерацію від СЕС/ВТ, синя — режим роботи АКБ. Графік демонструє, як генерація вдень сприяє заряджанню АКБ, а в нічний період АКБ забезпечує живлення навантаження. Це дозволяє оцінити ефективність добового циклу енергозабезпечення.

Логіка перемикання джерел живлення є частиною інтегрованої системи енергетичного управління, що включає модуль прогнозування генерації (на основі погодних даних), контролер заряду АКБ, модуль моніторингу навантаження та інтерфейс користувача для ручного втручання. Така система дозволяє адаптуватися до змінних умов, забезпечуючи стабільне енергозабезпечення домогосподарства навіть у критичних ситуаціях.

3.5. Аналіз надійності електропостачання

Надійність електропостачання є одним із ключових критеріїв ефективності автономної енергетичної системи, особливо в умовах обмеженого доступу до централізованих мереж або підвищених вимог до безперервності живлення. У запропонованій системі енергозабезпечення надійність досягається завдяки поєднанню прогнозованої генерації, адаптивного управління зарядом АКБ, моніторингу навантаження та можливості ручного втручання з боку користувача.

Система побудована за модульним принципом і включає такі функціональні компоненти:

– Модуль прогнозування генерації на основі погодних даних дозволяє заздалегідь оцінити доступну потужність від СЕС/ВТ, що є критично важливим для планування режимів заряджання АКБ та уникнення дефіциту енергії в нічний період.

– Контролер заряду АКБ забезпечує підтримку рівня SOC у допустимих межах, запобігаючи як глибокому розрядженню, так і надлишковому заряджанню. Це дозволяє продовжити термін служби акумуляторів та забезпечити їх готовність до роботи в аварійних режимах.

– Модуль моніторингу навантаження здійснює безперервне відстеження споживаної потужності, що дозволяє оперативно реагувати на пікові навантаження, оптимізувати розподіл енергії та уникати перевантажень.

– Інтерфейс користувача забезпечує можливість ручного втручання у роботу системи, зокрема в умовах нестандартних ситуацій, таких як різке зниження генерації, аварійне відключення одного з елементів або потреба у пріоритетному живленні критичних споживачів.

На основі побудованого добового графіка зміни SOC та балансу потужності (рис. 3.4.5) можна зробити висновок, що система здатна забезпечити стабільне живлення навантаження протягом доби. У денний період, коли генерація від СЕС/ВТ перевищує споживання, АКБ заряджається до цільового рівня. У вечірній та нічний час, за відсутності генерації, АКБ переходить у режим розрядження, забезпечуючи живлення навантаження. У разі досягнення критичного рівня SOC система автоматично

перемикається на резервне джерело живлення, що дозволяє уникнути повного знеструмлення.

Таким чином, запропонована система демонструє високий рівень надійності завдяки багаторівневому управлінню, адаптивності до змінних умов та наявності резервних механізмів. Це робить її придатною для використання в умовах підвищених вимог до безперервності електропостачання, зокрема в захищених об’єктах, критичній інфраструктурі або автономних домогосподарствах.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було здійснено технічне обґрунтування конфігурації комбінованої системи електропостачання домогосподарства з використанням вітросонячної установки. На основі аналізу кліматичних даних, архітектурних особливостей об’єкта та енергетичних потреб визначено оптимальний склад обладнання, що включає фотоелектричні панелі, вітроелектроустановку, акумуляторні батареї та резервне джерело живлення.

Проведено розрахунок продуктивності сонячної та вітрової генерації, обрано конкретні моделі обладнання на основі технічних характеристик і комерційної доступності. Запропонована структура системи забезпечує гнучкість, надійність та здатність до автономної роботи в умовах нестабільного зовнішнього енергопостачання.

Підготовлені дані та обґрунтовані параметри обладнання стали основою для подальшого моделювання режимів роботи системи, що буде здійснено в наступному розділі.

РОЗДІЛ 4
ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ

4.1. Оцінка вартості реалізації проєкту

Оцінка вартості реалізації проєкту комбінованої системи електропостачання домогосподарства з використанням вітросонячної установки є ключовим етапом техніко-економічного обґрунтування. Вона дозволяє визначити обсяг необхідних інвестицій, оцінити доцільність впровадження системи та сформувати базу для подальших розрахунків строку окупності та економічної ефективності. У контексті сучасних умов, коли енергетична безпека домогосподарств в Україні набуває критичного значення, правильна оцінка вартості стає не лише економічним, а й стратегічним завданням.

Загальна вартість проєкту включає кілька основних складових: вартість обладнання (сонячні панелі, вітроустановка, акумуляторні батареї, інвертори, контролери заряду, дизельний генератор), витрати на монтажні та пусконалагоджувальні роботи, вартість проєктної документації, витрати на логістику, а також резерв на непередбачені витрати. За даними ринку 2025 року, середня вартість одного Ватта встановленої потужності сонячної електростанції для приватного домогосподарства в Україні становить близько 35–50 грн, залежно від типу панелей, інверторів та умов монтажу. Вартість вітроустановки малої потужності (до 5 кВт) коливається в межах 60 000–100 000 грн за кіловат встановленої потужності, включаючи щоглу, систему керування та монтаж. Акумуляторні батареї, які є критично важливим елементом системи, мають вартість у межах 12 000–20 000 грн за кіловат-годину ємності, залежно від типу (гелеві, літій-залізо-фосфатні тощо) та виробника.

Для типового домогосподарства з середньодобовим споживанням електроенергії на рівні 10–12 кВт·год, доцільним є встановлення сонячної електростанції потужністю 5 кВт, вітроустановки потужністю 3 кВт, акумуляторної батареї ємністю 15–20 кВт·год, інвертора потужністю 5–7 кВт, а також резервного дизельного генератора

потужністю 3–5 кВт. З урахуванням середніх ринкових цін, вартість обладнання становитиме орієнтовно: сонячні панелі — 210 000 грн, вітроустановка — 250 000 грн, акумуляторна батарея — 300 000 грн, інвертор — 63 000 грн, дизельний генератор — 42 000 грн. Таким чином, загальна вартість обладнання становить близько 865 000 грн. Додатково слід врахувати витрати на монтаж (10–15% від вартості обладнання), проєктні роботи (5–7%), логістику (3–5%) та резерв на непередбачені витрати (5–10%). У підсумку, загальна вартість реалізації проєкту може сягати 1 100 000–1 150 000 грн.

Важливо зазначити, що остаточна вартість залежить від конкретних умов об’єкта: географічного розташування, складності монтажу, наявності інфраструктури, типу даху, відстані до точки підключення тощо. Крім того, на вартість впливають коливання валютного курсу, зміни в податковому законодавстві, а також доступність державних або міжнародних програм підтримки впровадження ВДЕ. Наприклад, у 2024 році в Україні діяли програми часткового відшкодування вартості обладнання для домогосподарств, що встановлюють сонячні або вітрові установки, за рахунок місцевих бюджетів або міжнародних донорів, таких як GIZ, USAID, NEFCO тощо.

Оцінка вартості реалізації проєкту також повинна враховувати витрати на обслуговування та заміну обладнання протягом життєвого циклу системи. Зокрема, акумуляторні батареї мають обмежений ресурс (5–10 років), що потребує їхньої періодичної заміни. Вартість технічного обслуговування системи (перевірка контактів, очищення панелей, діагностика інвертора) становить орієнтовно 4000–8000 грн на рік. Усі ці витрати мають бути враховані в загальному економічному аналізі, що буде здійснено в наступних підрозділах.

Таким чином, оцінка вартості реалізації проєкту комбінованої вітросонячної системи для домогосподарства свідчить про значний обсяг початкових інвестицій, які, однак, можуть бути виправдані за рахунок довгострокової економії, підвищення енергетичної незалежності та екологічного ефекту.

4.2. Розрахунок строку окупності системи

Розрахунок строку окупності є одним із ключових показників економічної ефективності проєкту. Він дозволяє визначити період, протягом якого інвестиції, вкладені в реалізацію комбінованої системи електропостачання домогосподарства, будуть повністю компенсовані за рахунок зекономлених коштів на оплату електроенергії та можливих доходів від продажу надлишкової енергії. У сучасних умовах, коли тарифи на електроенергію постійно зростають, а ризики відключень залишаються високими, строк окупності стає не лише фінансовим, а й стратегічним критерієм доцільності впровадження автономних енергетичних рішень.

Для проведення розрахунку використовується класична методика визначення простої окупності Payback Period, яка базується на співвідношенні між загальними інвестиційними витратами та щорічною економією. Як було зазначено у підрозділі 4.1, загальна вартість реалізації проєкту становить орієнтовно 1 132 507 грн. Ця сума включає витрати на обладнання, монтаж, проєктні роботи, логістику та резерв на непередбачені витрати.

Щорічна економія формується за рахунок зменшення витрат на оплату електроенергії, яка раніше споживалась із централізованої мережі. За даними НКРЕКП, середній тариф на електроенергію для побутових споживачів у 2025 році становив 4,32 грн/кВт·год, а з урахуванням прогнозованого зростання у 2026–2028 роках очікується підвищення до 5,20–5,50 грн/кВт·год. Для домогосподарства з середньодобовим споживанням 10–12 кВт·год, річне споживання становить приблизно 4000–4500 кВт·год. Відповідно, щорічна економія на оплаті електроенергії становить:

$$4500 \text{ кВт·год} \times 5{,}20 \text{ грн/кВт·год} = 23\,400 \text{ грн/рік}$$

Окрім прямої економії, слід враховувати потенційний дохід від продажу надлишкової електроенергії за «зеленим» тарифом. За умовами чинного законодавства, домогосподарства, що мають сонячні електростанції потужністю до 30 кВт, можуть продавати надлишкову електроенергію за фіксованим тарифом, який у 2025 році становив 4,20 грн/кВт·год. За оцінками, надлишкова генерація може становити до 1000 кВт·год на рік, що дає додатковий дохід:

$$1000 \text{ кВт·год} \times 4.20 \text{ грн/кВт·год} = 4\,200 \text{ грн/рік}$$

Таким чином, загальна щорічна економія та дохід становлять:

$$23\,400 \text{ грн} + 4\,200 \text{ грн} = 27\,600 \text{ грн/рік}$$

Враховуючи ці показники, термін простої окупності проєкту становить:

$$1\,132\,507 \text{ грн} / 18\,600 \text{ грн/рік} \approx 41 \text{ рік}$$

Однак цей показник є надто високим і не відображає реалістичної картини. Причиною є те, що в базовому сценарії не враховано:

– зростання тарифів на електроенергію (яке може бути щорічно 10–15%)

– інфляційне знецінення грошових потоків

– можливість часткового фінансування проєкту за рахунок грантів або кредитів

– зниження витрат на обслуговування у разі використання більш ефективного обладнання

Для більш точного аналізу доцільно застосувати методику дисконтованого строку окупності, яка враховує зміну вартості грошей у часі. За умови щорічного зростання тарифу на 10% та використання коефіцієнта дисконтування 8%, строк окупності скорочується до 12–15 років, залежно від сценарію генерації, споживання та технічного ресурсу обладнання.

Таким чином, проєкт комбінованої системи електропостачання має тривалий строк окупності у базовому сценарії, однак за умови врахування динаміки тарифів, можливості продажу надлишкової енергії та використання фінансових інструментів підтримки, він може стати економічно доцільним у середньостроковій перспективі.

4.3. Порівняння з традиційними джерелами енергії (мережева електрика, генератор)

У цьому підрозділі здійснюється порівняльний аналіз комбінованої вітросонячної системи електропостачання домогосподарства з традиційними джерелами енергії, зокрема централізованою мережею та дизельним генератором. Такий аналіз дозволяє оцінити переваги та недоліки кожного варіанту з точки зору економічної ефективності, надійності, екологічного впливу та енергетичної незалежності.

Централізоване електропостачання, яке історично забезпечувало більшість домогосподарств в Україні, має низку переваг: відносно низька початкова вартість підключення, стабільна якість електроенергії, відсутність потреби в обслуговуванні обладнання з боку споживача. Однак у сучасних умовах ці переваги суттєво нівелюються. За даними НКРЕКП, середній тариф на електроенергію для побутових споживачів у 2025 році становив 4,32 грн/кВт·год, а з урахуванням прогнозованого зростання у 2026–2028 роках очікується підвищення до 5,50 грн/кВт·год. Крім того, централізована система є вразливою до зовнішніх загроз, зокрема в умовах військових дій, техногенних аварій та дефіциту генеруючих потужностей. Часті аварійні відключення, обмеження споживання та нестабільність постачання створюють додаткові ризики для домогосподарств, особливо в регіонах з низькою енергетичною стійкістю.

Дизельний генератор, як альтернатива централізованому постачанню, забезпечує автономність та можливість резервного живлення у випадку відключень. Його перевагами є мобільність, швидкий запуск, відносно низька вартість придбання (від 30 000 до 50 000 грн для потужності 3–5 кВт). Однак експлуатація генератора супроводжується високими експлуатаційними витратами, зокрема на паливо, технічне обслуговування та заміну витратних матеріалів. За даними Держстату, середня вартість дизельного пального у 2025 році становила 58 грн/л. Для генератора потужністю 5 кВт, який споживає близько 1,5 л/год, щоденна робота протягом 8 годин обійдеться у 660 грн, що еквівалентно 19 800 грн на місяць. Крім того, дизельні генератори мають високий рівень шуму, викиди CO_2 та інші екологічні ризики, що обмежує їхнє використання у житлових зонах.

Комбінована вітросонячна система, яка поєднує сонячну та вітрову генерацію з акумуляторним накопиченням та резервом, дозволяє досягти балансу між автономністю, екологічністю та економічною ефективністю. Початкові інвестиції у таку систему є значно вищими (понад 1 100 000 грн), однак її експлуатація не потребує постійних витрат на паливо, а технічне обслуговування є мінімальним. Крім того, система дозволяє генерувати електроенергію з відновлюваних джерел, що знижує викиди парникових газів та сприяє досягненню кліматичних цілей. За оцінками Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), кожен кіловат-година,

вироблений з ВДЕ, дозволяє уникнути викидів до 0,6 кг CO_2 порівняно з традиційною генерацією.

Таким чином, порівняння демонструє, що хоча централізована електрика та дизельні генератори мають нижчий поріг входу, вони поступаються комбінованій системі за показниками довгострокової економії, екологічної безпеки та енергетичної незалежності. В умовах зростання тарифів, нестабільності постачання та екологічних викликів, саме комбіновані системи на основі ВДЕ є найбільш перспективним рішенням для домогосподарств, що прагнуть автономності та сталого розвитку.

4.4. Розрахунок зниження викидів CO_2 та екологічного ефекту

Одним із ключових аргументів на користь впровадження комбінованих систем електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії є їхній позитивний екологічний ефект, зокрема зниження викидів парникових газів. У цьому підрозділі здійснюється розрахунок потенційного зниження викидів CO_2 внаслідок переходу домогосподарства від традиційних джерел енергії (мережева електрика, дизельний генератор) до автономної вітросонячної установки.

За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), середній коефіцієнт викидів CO_2 для електроенергії, виробленої з викопного палива, становить приблизно 0,6–0,9 кг CO_2 на 1 кВт·год, залежно від типу генерації (вугілля, газ, мазут) [16]. Для дизельних генераторів цей показник є ще вищим — близько 2,7 кг CO_2 на 1 л пального, що при середньому споживанні 1,5 л/год дає понад 4 кг CO_2 на кожну годину роботи. Водночас, електроенергія, вироблена з сонячної або вітрової генерації, має нульові прямі викиди CO_2, що дозволяє суттєво зменшити екологічне навантаження.

Для типового домогосподарства з річним споживанням електроенергії на рівні 4500 кВт·год, перехід на комбіновану систему дозволяє уникнути викидів у межах:

$$4500 \text{ кВт·год} \times 0{,}7 \text{ кг } CO_2/\text{кВт·год} = 3150 \text{ кг } CO_2/\text{рік}$$

Це еквівалентно приблизно 3,15 тонни CO_2 щорічно. Якщо врахувати, що середній легковий автомобіль викидає близько 2,3–2,7 т CO_2 на рік, то екологічний

ефект від переходу на автономну систему електропостачання можна порівняти з повною відмовою від використання одного автомобіля.

Додатково слід врахувати зниження непрямих викидів, пов’язаних із транспортуванням пального, втратами в мережах, виробництвом та утилізацією витратних матеріалів для генераторів. За оцінками Європейського агентства з навколишнього середовища (EEA), такі втрати можуть становити до 10–15% від загального обсягу викидів, що додає ще близько 300–500 кг CO_2 на рік.

Таким чином, загальний екологічний ефект від впровадження комбінованої вітросонячної системи для одного домогосподарства становить орієнтовно 3,5–3,7 тонни CO_2 на рік. У масштабах країни, за умови впровадження таких систем у 100 тисяч домогосподарств, це дозволить уникнути понад 350 тисяч тонн CO_2 щорічно, що є суттєвим внеском у виконання міжнародних кліматичних зобов’язань України.

Окрім зниження викидів, важливим екологічним ефектом є зменшення шумового забруднення, зниження ризиків витоку пального, зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв та покращення якості повітря в житлових районах. Відновлювані джерела енергії не створюють локальних викидів, не потребують зберігання небезпечних речовин і не генерують відходів у процесі експлуатації, що робить їх екологічно безпечними для використання у приватному секторі.

Таким чином, впровадження комбінованої системи електропостачання на основі ВДЕ дозволяє не лише забезпечити енергетичну автономію домогосподарства, а й зробити вагомий внесок у збереження довкілля, зниження викидів парникових газів та досягнення цілей сталого розвитку.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було здійснено комплексне техніко-економічне та екологічне обґрунтування впровадження комбінованої системи електропостачання домогосподарства з використанням вітросонячної установки. Проведено детальний розрахунок вартості реалізації проєкту, який показав, що загальні інвестиційні витрати становлять орієнтовно 1 132 507 грн, включаючи вартість обладнання, монтажу, проєктних робіт та резерв на непередбачені витрати.

Розрахунок строку окупності системи засвідчив, що за базового сценарію з фіксованими тарифами на електроенергію, період повернення інвестицій перевищує 40 років. Водночас, за умови врахування прогнозованого зростання тарифів, доходів від продажу надлишкової енергії за «зеленим» тарифом та застосування дисконтованого аналізу, строк окупності скорочується до 12–15 років, що є прийнятним показником для довгострокових інвестицій у сфері енергетики.

Порівняльний аналіз із традиційними джерелами енергії (мережева електрика, дизельний генератор) показав, що хоча останні мають нижчий поріг входу, вони поступаються комбінованій системі за показниками надійності, довгострокової економії, екологічної безпеки та енергетичної незалежності. Особливо актуальним є зниження залежності від централізованих мереж в умовах нестабільного енергопостачання.

Розрахунок екологічного ефекту підтвердив, що впровадження комбінованої системи дозволяє уникнути викидів до 3.7 тонн CO_2 на рік для одного домогосподарства. Це еквівалентно повній компенсації викидів середнього легкового автомобіля. У масштабах країни, за умови масового впровадження таких систем, можливе щорічне скорочення викидів на сотні тисяч тонн, що є вагомим внеском у досягнення кліматичних цілей України.

Таким чином, результати розділу підтверджують економічну доцільність, екологічну ефективність та стратегічну важливість впровадження комбінованих вітросонячних систем електропостачання для підвищення енергетичної автономії приватних домогосподарств.

РОЗДІЛ 5
ПРАВИЛА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА БЕЗПЕКА

5.1. Вимоги до встановлення обладнання

Правильне встановлення обладнання комбінованої вітросонячної системи електропостачання є критично важливим для забезпечення її надійної, безпечної та довготривалої експлуатації. Встановлення повинно здійснюватися відповідно до чинних нормативних документів, зокрема Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), ДБН В.2.5-23:2010, ДСТУ EN 62446-1:2021, а також технічних рекомендацій виробників обладнання.

Першочерговою вимогою є вибір відповідного місця для розміщення сонячних панелей. Вони повинні встановлюватися на дахах або відкритих майданчиках з максимальним рівнем інсоляції, орієнтованих на південь з кутом нахилу, оптимізованим для конкретної широти (в Україні — 30–35°). Поверхня повинна бути міцною, стійкою до вітрових та снігових навантажень, а також забезпечувати вільний доступ для обслуговування. Не допускається затінення панелей деревами, будівлями або іншими об’єктами, оскільки це суттєво знижує ефективність генерації.

Вітроустановка повинна монтуватися на відкритій ділянці з мінімальними турбулентними перешкодами. Щогла має бути встановлена на бетонному фундаменті з урахуванням вітрового навантаження, типу ґрунту та висоти конструкції. Мінімальна рекомендована висота щогли — 6–10 метрів, залежно від моделі генератора та локальних вітрових умов. Важливо забезпечити наявність заземлення та блискавкозахисту відповідно до вимог ДСТУ EN 62305.

Акумуляторні батареї повинні встановлюватися в окремому сухому приміщенні з природною або примусовою вентиляцією. Температурний режим має бути стабільним, у межах +10…+25 °C, що забезпечує оптимальні умови для зберігання заряду та подовжує термін служби батарей. Заборонено розміщення АКБ

поблизу джерел тепла, відкритого вогню або вологих зон. У разі використання кислотних або гелевих батарей необхідно передбачити систему збору витоків електроліту та нейтралізації парів.

Інвертор, контролер заряду та інше силове обладнання встановлюються в електрощитовій або технічному приміщенні з дотриманням вимог до вентиляції, захисту від пилу та вологи (ступінь IP не нижче 54). Всі з’єднання повинні виконуватись із застосуванням сертифікованих кабелів, розрахованих на відповідні струмові навантаження, з дотриманням кольорового маркування та механічного захисту. Монтаж має здійснюватися кваліфікованими фахівцями з відповідним допуском до робіт в електроустановках напругою до 1000 В.

Особливу увагу слід приділити системі заземлення. Усі металеві частини конструкцій, корпуси обладнання, щогли, каркаси панелей повинні бути надійно заземлені. Опір заземлювального контуру не повинен перевищувати 4 Ом, що перевіряється відповідно до вимог ПУЕ. У разі встановлення системи блискавкозахисту необхідно забезпечити її електричну та механічну сумісність із заземленням енергетичного обладнання.

Таким чином, дотримання вимог до встановлення обладнання є запорукою безпечної, ефективної та довговічної роботи комбінованої вітросонячної системи. Невиконання цих вимог може призвести до зниження продуктивності, передчасного зносу обладнання або виникнення аварійних ситуацій.

5.2. Системи захисту: від перевантаження, короткого замикання, перенапруги

Забезпечення електробезпеки в комбінованих системах електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії є критично важливим завданням, що охоплює як проєктну, так і експлуатаційну стадії. Враховуючи наявність декількох джерел генерації (сонячна та вітрова енергія), накопичувальних пристроїв (акумуляторні батареї), інверторного обладнання та резервного генератора, система повинна бути оснащена багаторівневим захистом, який забезпечує безпечну роботу в усіх можливих режимах.

Захист від перевантаження реалізується шляхом встановлення автоматичних вимикачів, які спрацьовують при перевищенні допустимого струму в лінії. Перевантаження може виникати як унаслідок підключення надмірної кількості споживачів, так і через несправність обладнання. Автоматичні вимикачі повинні відповідати номінальному струму лінії та мати відповідну характеристику спрацювання (тип B — для освітлення, тип C — для побутових приладів, тип D — для індуктивних навантажень). Встановлення таких пристроїв передбачено [20, 21], які регламентують вимоги до апаратури захисту низьковольтних електричних мереж.

Захист від короткого замикання (КЗ) є ще більш критичним, оскільки струми КЗ можуть у десятки разів перевищувати номінальні значення, що призводить до перегріву провідників, займання ізоляції, пошкодження обладнання та загрози життю людей. Для захисту від КЗ використовуються як автоматичні вимикачі з високою здатністю відключення (6–10 кА), так і плавкі запобіжники типу NH або gG. У системах з акумуляторними батареями особливу увагу слід приділити захисту ліній постійного струму, де струм КЗ може досягати сотень ампер. У таких випадках доцільно використовувати спеціалізовані DC-запобіжники з номіналом, що перевищує максимальний струм розряду АКБ, але не перевищує допустимий струм провідника.

Захист від перенапруги реалізується шляхом встановлення обмежувачів перенапруги (ОПН), які спрацьовують при раптовому підвищенні напруги в мережі, викликаному грозовими розрядами, комутаційними процесами або аваріями в зовнішній мережі. Згідно з, ОПН повинні мати клас захисту не нижче II (тип 2) для побутових систем, а їхня номінальна напруга повинна відповідати робочій напрузі системи (230 В для однофазних, 400 В — для трифазних систем). У разі використання вітроустановки з металевою щоглою, необхідно передбачити блискавкозахист відповідно до, який включає блискавкоприймач, струмовідвід та заземлювальний контур.

Окремо слід розглянути захист інверторного обладнання. Сучасні інвертори мають вбудовані системи самодіагностики, які дозволяють виявляти перевищення температури, перенапругу, зворотну полярність, перевантаження та інші аномальні ре-

жими. У разі виявлення несправності інвертор автоматично переходить у режим захисту або повністю відключає вихід. Це дозволяє уникнути пошкодження як самого інвертора, так і підключених до нього споживачів. Деякі моделі також мають функцію реєстрації подій, що дозволяє проводити аналіз аварійних ситуацій.

У системах, інтегрованих із мережею, обов'язковим є встановлення реле контролю параметрів мережі (РКПМ), які відключають систему при відхиленні напруги або частоти від допустимих меж. Це запобігає зворотному живленню мережі у разі її знеструмлення, що є вимогою стандартів безпеки та умов підключення до мережі оператора системи розподілу (ОСР).

Захист від зворотного струму також є важливим елементом, особливо у випадках, коли сонячні панелі або вітроустановка підключені до спільної шини. Для цього використовуються діоди Шотткі або електронні контролери, які запобігають розряду АКБ через генератори у нічний час або при відсутності вітру.

Таким чином, система захисту комбінованої вітросонячної установки повинна бути багаторівневою, охоплювати всі елементи системи та відповідати чинним нормативним вимогам. Її правильне проєктування та реалізація є запорукою безпечної, надійної та довговічної експлуатації системи, а також захисту користувачів від потенційних електротехнічних ризиків.

5.3. Інструкції з обслуговування та ремонту

Належне обслуговування та своєчасний ремонт обладнання комбінованої вітросонячної системи електропостачання є запорукою її стабільної роботи, продовження терміну служби та збереження технічних характеристик. Обслуговування охоплює як планові профілактичні заходи, так і реагування на несправності, що виникають у процесі експлуатації. Всі роботи повинні виконуватись відповідно до інструкцій виробників, чинних нормативних документів, а також з урахуванням вимог безпеки, викладених у [20, 21, 22].

Сонячні панелі потребують регулярного очищення від пилу, листя, снігу та інших забруднень, які можуть знижувати ефективність генерації. Рекомендовано проводити візуальний огляд панелей щонайменше двічі на рік, а також після сильних опадів або вітрових бур. Очищення слід здійснювати м’якою тканиною або спеціальними щітками з використанням води без агресивних хімічних засобів. Заборонено застосування абразивних матеріалів, які можуть пошкодити поверхню фотомодулів. У разі виявлення тріщин, деламінації або зміни кольору панелі, необхідно звернутись до сервісного центру для діагностики та заміни.

Вітроустановка потребує періодичного огляду щогли, лопатей, генератора та системи керування. Щогла повинна бути перевірена на предмет корозії, механічних пошкоджень та надійності кріплення. Лопаті слід оглядати на наявність тріщин, деформацій або слідів ударів. Генератор перевіряється на рівень шуму, перегрів, стан підшипників та електричних з’єднань. Рекомендовано проводити технічне обслуговування вітроустановки щонайменше раз на рік, а також після екстремальних погодних умов. У разі виявлення несправностей, ремонт повинен здійснюватися сертифікованими фахівцями з дотриманням вимог електробезпеки.

Акумуляторні батареї потребують особливої уваги, оскільки їхній стан безпосередньо впливає на стабільність живлення. Для кислотних і гелевих АКБ необхідно контролювати рівень електроліту, відсутність витоків, температуру корпусу та напругу на клемах. Літієві батареї мають вбудовані системи моніторингу, однак також потребують регулярного огляду. Рекомендовано проводити перевірку АКБ щонайменше раз на квартал, а також після глибокого розряду або тривалого простою. У разі зниження ємності, підвищення внутрішнього опору або появи ознак деградації, батареї підлягають заміні.

Інвертор та контролер заряду є електронними пристроями, що потребують періодичної діагностики. Основними параметрами для контролю є температура корпусу, стабільність вихідної напруги, наявність помилок у системному журналі, а також стан вентиляційних отворів. Очищення корпусу слід здійснювати сухою тканиною, без застосування води або розчинників. У разі виявлення несправностей, таких

як перегрів, нестабільна робота або відсутність вихідного сигналу, необхідно звернутись до виробника або авторизованого сервісного центру.

Ремонтні роботи повинні здійснюватися виключно кваліфікованими фахівцями з відповідним допуском до робіт в електроустановках. Самостійне втручання в роботу системи без належної підготовки може призвести до ураження електричним струмом, пошкодження обладнання або втрати гарантії. Усі ремонтні заходи повинні документуватись у технічному журналі обслуговування, із зазначенням дати, характеру несправності, виконаних робіт та відповідальної особи.

Таким чином, регулярне обслуговування та своєчасний ремонт є необхідною умовою для забезпечення безпечної, ефективної та довготривалої роботи комбінованої вітросонячної системи. Дотримання інструкцій виробників, нормативних вимог та правил електробезпеки дозволяє мінімізувати ризики, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільне енергопостачання домогосподарства.

5.4. Заходи безпеки при експлуатації вітросонячних установок

Безпечна експлуатація комбінованих вітросонячних установок є критично важливою умовою для забезпечення надійної роботи системи, захисту користувачів та запобігання аварійним ситуаціям. Враховуючи наявність високої напруги, обертових елементів, акумуляторних батарей та можливість впливу зовнішніх факторів (грозові розряди, вітрові навантаження, температурні коливання), система повинна експлуатуватись відповідно до вимог електробезпеки, пожежної безпеки та охорони праці.

Першочерговим заходом є дотримання вимог до електробезпеки. Усі роботи з обслуговування, діагностики та ремонту повинні виконуватись лише при повному знеструмленні відповідної ділянки системи. Заборонено проводити будь-які маніпуляції з відкритими струмопровідними частинами без використання засобів індивідуального захисту (діелектричні рукавички, інструмент з ізоляцією, захисні окуляри). Усі металеві корпуси обладнання повинні бути надійно заземлені, а опір заземлення — відповідати нормативним вимогам (не більше 4 Ом).

Особливу увагу слід приділити безпеці при роботі з акумуляторними батареями. У разі використання кислотних або гелевих АКБ необхідно забезпечити вентиляцію приміщення, наявність нейтралізуючих засобів (сода, пісок), а також засобів пожежогасіння. Заборонено курити, використовувати відкритий вогонь або нагрівальні прилади поблизу батарей. У разі витоку електроліту необхідно негайно локалізувати зону забруднення, нейтралізувати речовину та звернутись до сервісного центру. Літієві батареї, хоча й менш вибухонебезпечні, також потребують контролю температурного режиму та захисту від механічних пошкоджень.

При експлуатації вітроустановки необхідно враховувати ризики, пов’язані з обертовими елементами та висотними роботами. Заборонено наближатися до лопатей генератора під час його роботи, особливо у вітряну погоду. Усі монтажні та оглядові роботи на щоглі повинні виконуватись із застосуванням страхувальних засобів, відповідно до вимог ДНАОП 0.00-1.03-13 «Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті». Щогла повинна бути обладнана блискавкоприймачем, а зона навколо неї — огороджена для запобігання доступу сторонніх осіб.

Інверторне та силове обладнання повинно експлуатуватись у сухому, вентильованому приміщенні з обмеженим доступом. Заборонено перекривати вентиляційні отвори, розміщувати легкозаймисті матеріали поблизу корпусу, а також підключати споживачів, що перевищують допустиме навантаження. У разі перегріву, появи запаху гару або сторонніх звуків, обладнання слід негайно знеструмити та звернутись до сервісного центру.

Окрему категорію заходів безпеки становить пожежна безпека. Система повинна бути обладнана вогнегасниками (вуглекислотними або порошковими), пожежною сигналізацією та засобами локалізації загоряння. Усі користувачі повинні бути ознайомлені з інструкцією з пожежної безпеки, а також пройти первинний інструктаж з охорони праці. Рекомендовано вести журнал технічного обслуговування та безпеки, де фіксуються всі перевірки, несправності та виконані роботи.

Таким чином, дотримання заходів безпеки при експлуатації комбінованої вітросонячної установки є необхідною умовою для запобігання аваріям, захисту життя та здоров’я користувачів, а також забезпечення стабільної роботи системи. Всі заходи

повинні базуватись на чинних нормативних документах, інструкціях виробників та принципах системного підходу до управління ризиками.

Висновки до розділу 5

У п’ятому розділі розглянуто технічні та організаційні заходи, необхідні для безпечної експлуатації комбінованої вітросонячної системи електропостачання домогосподарства. Визначено вимоги до встановлення обладнання: вибір місця монтажу, дотримання нормативів, забезпечення вентиляції, заземлення та захисту від зовнішніх впливів. Особливу увагу приділено стандартам ПУЕ, ДБН та ДСТУ, що регламентують електробезпеку та монтаж.

Проаналізовано системи захисту від перевантаження, короткого замикання та перенапруги. Ефективна система повинна включати автоматичні вимикачі, запобіжники, обмежувачі перенапруги, пристрої контролю параметрів та моніторинг. Їхнє правильне проєктування є запорукою стабільної роботи системи.

Описано регламент обслуговування основних елементів: сонячних панелей, вітроустановки, АКБ, інверторів. Визначено періодичність оглядів, типові несправності, вимоги до персоналу та ведення документації. Наголошено на важливості профілактичного обслуговування для подовження ресурсу обладнання.

Розглянуто заходи безпеки: електробезпеку, пожежну безпеку, охорону праці при роботі на висоті, поводження з АКБ та обертовими елементами. Підкреслено необхідність ЗІЗ, вогнегасників, блискавкозахисту та обмеження доступу до технічних зон.

Таким чином, дотримання правил експлуатації, системного підходу до захисту та обслуговування забезпечує надійну й безпечну роботу комбінованої системи, що відповідає сучасним вимогам до автономних енергетичних рішень.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено комплексне дослідження з розробки комбінованої системи електропостачання домогосподарства з використанням вітросонячної установки. На основі проведеного аналізу, технічного проєктування, моделювання та економічного обґрунтування підтверджено технічну та економічну доцільність впровадження автономної гібридної енергетичної системи для приватного сектору.

У першому розділі обґрунтовано актуальність теми, проаналізовано сучасний стан та тенденції розвитку відновлюваної енергетики в Україні та світі. Встановлено, що саме гібридні системи, які поєднують сонячну та вітрову генерацію, є найбільш ефективним рішенням для забезпечення енергетичної автономії домогосподарств в умовах сезонних коливань. У другому розділі розроблено технічну структуру комбінованої системи електропостачання, що включає сонячні панелі, вітроустановку, акумуляторні батареї, інвертор та резервне джерело живлення. Проведено розрахунок продуктивності кожного елементу з урахуванням кліматичних даних та технічних характеристик обладнання. У третьому розділі визначено кліматичні характеристики місцевості та енергетичний профіль типового домогосподарства. На основі аналізу споживання електроенергії сформовано вимоги до потужності генерації та ємності накопичувальних систем. ВЕУ доповнює СЕС у нічний та зимовий періоди, активується автоматично при наявності вітру, та здатна генерувати до 7 кВт·год на добу. Акумуляторна система забезпечує резервне живлення протягом 8–12 годин, рекомендовано використання літій-залізо-фосфатних акумуляторів ємністю 330–500 А·год при напрузі 48 В.

У третьому розділі визначено кліматичні характеристики місцевості та енергетичний профіль типового домогосподарства. На основі аналізу споживання електроенергії сформовано вимоги до потужності генерації та ємності накопичувальних систем. ВЕУ доповнює СЕС у нічний та зимовий періоди, активується автоматично при наявності вітру, та здатна генерувати до 7 кВт·год на добу. Акумуляторна система

забезпечує резервне живлення протягом 8–12 годин, рекомендовано використання літій-залізо-фосфатних акумуляторів ємністю 330–500 А·год при напрузі 48 В.

У четвертому розділі здійснено техніко-економічне обґрунтування проєкту. Визначено капітальні витрати, щорічну економію, потенційний дохід від продажу надлишкової електроенергії за «зеленим» тарифом. Розраховано термін простої та скоригованої окупності, який за оптимістичним сценарієм становить 17–22 роки. Також проаналізовано вимоги до встановлення обладнання, системи захисту, регламент обслуговування та заходи безпеки. Щорічна економія на оплаті електроенергії становить 23400 грн/рік.

У п’ятому розділі розглянуто технічні та організаційні заходи, необхідні для безпечної експлуатації комбінованої вітросонячної системи електропостачання домогосподарства. Визначено вимоги до встановлення обладнання: вибір місця монтажу, дотримання нормативів, забезпечення вентиляції, заземлення та захисту від зовнішніх впливів. Особливу увагу приділено стандартам ПУЕ, ДБН та ДСТУ, що регламентують електробезпеку та монтаж.

У підсумку, запропоноване технічне рішення дозволяє досягти високого рівня енергетичної автономії, знизити залежність від централізованих мереж, зменшити викиди парникових газів та підвищити енергетичну безпеку на рівні побутового сектору. Робота має практичну цінність і може бути використана як основа для впровадження аналогічних систем у приватних домогосподарствах України.

Крім того, розроблена модель може бути адаптована для інших типів об’єктів — малих підприємств, фермерських господарств, соціальних установ — з урахуванням їхніх специфічних енергетичних потреб. Це відкриває перспективи для масштабування рішень у межах регіональних програм енергоефективності.

Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших наукових досліджень у сфері оптимізації гібридних систем, розробки алгоритмів керування, а також для створення навчальних матеріалів у галузі енергетики та автоматизації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична система України: стан на кінець 2024 року та сценарії на 2025. [Електронний ресурс] / Oil&Gas Ukraine. – Режим доступу: https://oil-gas.com.ua/statti/enerhetychna_systema_ukrainy_stan_na_kinets_2024_roku_ta_stsenarii_na_2025 – Дата звернення: 20.10.2025.

2. Зміцнення стійкості населення до ризиків для доступності енергетичних ресурсів. [Електронний ресурс] / Національний інститут стратегічних досліджень. – Режим доступу: https://niss.gov.ua/doslidzhennya/sotsialna-polityka/zmitsnennya-stiykosti-naselennya-do-ryzykiv-dlya-dostupnosti – Дата звернення: 20.10.2025.

3. Energy sector in Ukraine and the world: forecasts and challenges. [Електронний ресурс] / BDO Ukraine. – Режим доступу: https://www.bdo.ua/uk-ua/insights-2/information-materials/2024/energy-sector-in-ukraine-and-the-world-forecasts-and-challenges – Дата звернення: 20.10.2025.

4. Принцип роботи сонячної електростанції: як вони генерують енергію від сонця. [Електронний ресурс] / EcoTech Ukraine. – Режим доступу: https://www.ecotech.ua/prynczyp-roboty-sonyachnoyi-elektrostancziyi-yak-vony-generuyut-energiyu-vid-sonczya/ – Дата звернення: 20.10.2025.

5. Будова та принцип роботи обладнання вітрових електричних станцій. [Електронний ресурс] / Profosvita. – Режим доступу: https://profosvita.online/courses/course-v1:Profosvita+CS-S018-SGM+2025/jump_to/block-v1:Profosvita+CS-S018-SGM+2025+type@vertical+block@47e5c99da5fc41e5908f86333c018052 – Дата звернення: 20.10.2025.

6. Схеми і конструктивні елементи ВЕУ з горизонтальною та вертикальною віссю обертання. [Електронний ресурс] / Підручники онлайн. – Режим доступу: https://pidru4niki.com/83027/tehnika/shemi_konstruktivni_elementi_gorizontalnoyu_vissyu_obertannya – Дата звернення: 20.10.2025.

7. Кузнєцов М. П. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії: монографія. – Київ: ІВЕ НАН України, 2022. – 142 с.

8. Лекція 11. Особливості комбінованих систем енергопостачання з ВДЕ. [Електронний ресурс] / Вінницький національний технічний університет. – Режим доступу: https://mpa.vntu.edu.ua/fdb/1050/ – Дата звернення: 20.10.2025.

9. Сонячна енергетика: показники ринку. [Електронний ресурс] / ProfBuild. – Режим доступу: https://www.profbuild.in.ua/uk/vsi-statti-zhurnala-prof-build/6501-sonyachna-energetika-pokazniki-rinku – Дата звернення: 20.10.2025.

10. Аналітичний звіт: Відновлювальна енергетика в Україні. [Електронний ресурс] / BDO Ukraine. – Режим доступу: https://www.bdo.ua/uk-ua/insights-2/information-materials/2023/analytical-report-on-the-ukrainian-renewable-energy-sector – Дата звернення: 20.10.2025.

11. Регулювання галузі ВДЕ: підсумки 2024 року. [Електронний ресурс] / PRAVO.UA. – Режим доступу: https://pravo.ua/rehuliuvannia-haluzi-vde-pidsumky-2024-roku/ – Дата звернення: 20.10.2025.

12. Запровадження гарантій походження електроенергії з ВДЕ в Україні. [Електронний ресурс] / LigaZakon. – Режим доступу: https://biz.ligazakon.net/analitycs/228512_zaprovadzhennya-garanty-pokhodzhennya-elektroenerg-z-vde-v-ukran – Дата звернення: 20.10.2025.

13. Ковальчук О.І., Мельник В.В. Системи автономного електропостачання: навч. посібник. — Київ: Ліра-К, 2020. — 160 с.

14. Гуменюк С.М., Шевченко А.В. Гібридні енергетичні системи: теорія і практика. — Харків: НТУ «ХПІ», 2021. — 224 с.

15. BDO Ukraine. Аналітичний огляд розвитку відновлюваної енергетики в Україні: тенденції, ризики та перспективи : аналіт. доп. / BDO Advisory. – Київ : BDO Ukraine, 2024. – 36 с.

16. IRENA. Renewable Energy and Climate Goals: CO_2 Avoidance Factors [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://irena.org

17. Державна служба статистики України. Середні показники споживання пального [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ukrstat.gov.ua

18. European Environment Agency. Average passenger car emissions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps

19. EEA. Greenhouse gas emission intensity of electricity generation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.eea.europa.eu

20. ПУЕ. Правила улаштування електроустановок. – К.: Мінпаливенерго України, 2006.

21. ДСТУ EN 60947-2:2019. Апаратура низьковольтна. Частина 2. Автоматичні вимикачі.

22. ДСТУ EN 61643-11:2020. Пристрої захисту від перенапруги. Частина 11. Вимоги та методи випробувань.

23. ДСТУ EN 62305: 2011. Захист від блискавки. Частини 1–4.

24. Schneider Electric. Каталог обладнання для захисту фотоелектричних систем. – 2023.

25. Victron Energy. Technical White Paper: Battery Protection and DC Fusing. – 2022.

26. Shvedchykova I., Trykhlieb A., Trykhlieb S., Demishonkova S., Pavlenko V. Determining the efficiency of restored photovoltaic modules under natural lighting conditions // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 6(8). – P. 16–24. – DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317829.

27. Shavolkin O., Shvedchykova I., Demishonkova S., Pavlenko V. Increasing the efficiency of hybrid photoelectric system equipped with a storage battery to meet the needs of local object with generation of electricity into grid // Przeglad Elektrotechniczny. – 2021. – Vol. 97, № 11.

28. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Ponomarenko D., Danylchenko D. Synergy of Blockchain and Artificial Intelligence for Decentralized Smart Energy Management // Smart Innovations in Energy and Mechanical Systems. SIEMS 2025. Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, Cham. – Vol. 1480. – 2025. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95191-6_18.

29. Павленко В. М., Воляник О. Ю., Пономаренко І. В., Даннильченко Д. О. Дослідження перспектив розвитку технології «розумних енергосистем» із застосуванням розподілених баз даних // Енергетика і автоматика. – 2024. – № 5(75). – С. 66–76. – DOI: https://doi.org/10.31548/energiya5(75).2024.066.

30. Колос Д. М., Павленко В. М. Інтелектуальна гібридна система зберігання енергії з функцією резервного живлення для критичних споживачів // Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 34–35.

31. Яворський В. І., Павленко В. М. Вплив уніфікації інверторного обладнання на продуктивність мікромережі // Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 46–47.

32. Nikitin Y., Pavlenko V. Comparison of the performance of the different types of stirling engines in power generation systems // Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 13–14.

33. Nikitin Y., Pavlenko V., Volianyk O. The role of smart technologies in improving the reliability and efficiency of power grids // Технічна творчість. – 2024. – № 8. – С. 91–92.

34. Nikitin Y., Pavlenko V., Volianyk O. Technological integration of stirling engines in fuel boilers as the basis for high performing micro-chp with low emissions // Технічна творчість. – 2024. – № 8. – С. 99–101.

35. Вакарчук К. А., Павленко В. М. Система контролю заряджання збірки Li-ion акумуляторів // Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології. – Київ: КНУТД, 2024. – С. 18–19.

36. Pavlenko V., Volianyk O. Research of technical solutions for cybersecurity of power systems with integrated renewable energy sources // Технічна творчість. – 2024. – № 8. – С. 93–94.

37. Кушнір Д. В., Павленко В. М. Підвищення надійності та ефективності управління енергоспоживанням підприємства на основі технологій IoT // Електромеханічні, інформаційні системи та нанотехнології. – Київ: КНУТД, 2025. – С. 169.

38. Pavlenko V., Kurliak P., Volianyk O. Designing a control system for mechanisms with variable imbalance // Technologies and Engineering. – 2023. – № 6. – С. 41–52.

39. Pavlenko V., Ponomarenko I., Fedorchenko A., Onofriichuk V., Chorna O., Pylypenko V. Development and Marketing Promotion of the Educational Program Mobile Application in the Field of Electrical Engineering // 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). – IEEE, 2022. – С. 1–5.

40. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Osadchyi V., Ponomarenko D., Hrygorevska O. Using Artificial Intelligence to Control Drones // 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). – IEEE, 2023. – С. 182–185.

41. Pavlenko V., Ponomarenko I., Morhulets O., Fedorchenko A., Chorna O., Pylypenko V. Creating Educational Products With Using Data Science and Digital Marketing // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – IEEE, 2023. – С. 1–4.

42. Pavlenko V., Kurliak P., Horiashchenko S., Volianyk O., Batsala Y., Nikitchuk T. Computer-integrated system of automatic balance control in centrifuge rotors with variable imbalance // 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). – IEEE, 2023. – С. 1–5.

43. Pavlenko V., Volianyk O. Investigation of recuperator efficiency using in residential premises // Вісник КНУТД. Серія: Технічні науки. – 2019. – № 4. – С. 77–85.

44. Павленко В. М., Ткаченко Д. О. Оцінювання ефективності використання рекуператора в системах вентиляції офісних приміщень // Технології та дизайн. – 2018. – № 1.

45. Павленко В. М., Бунда Н. В. Тенденції розвитку ринку інформаційних технологій // Інноватика в освіті, науці та бізнесі. – Київ: КНУТД, 2022.

46. Павленко В. М., Пилипенко В. І. Удосконалення платформи Moodle для підвищення якості надання освітніх послуг // Дис. ... канд. техн. наук. – Українська інженерно-педагогічна академія, 2023.

47. Павленко В. М., Воляник О. Ю. Напрями застосування дронів в сучасних умовах // Технічна творчість. – 2023. – № 7. – С. 188–190.

48. Павленко В. М., Наконечний І. О. Ефективність використання інформаційних технологій в побуті // Інтеграція науки і освіти. – Київ: КНУТД, 2022.

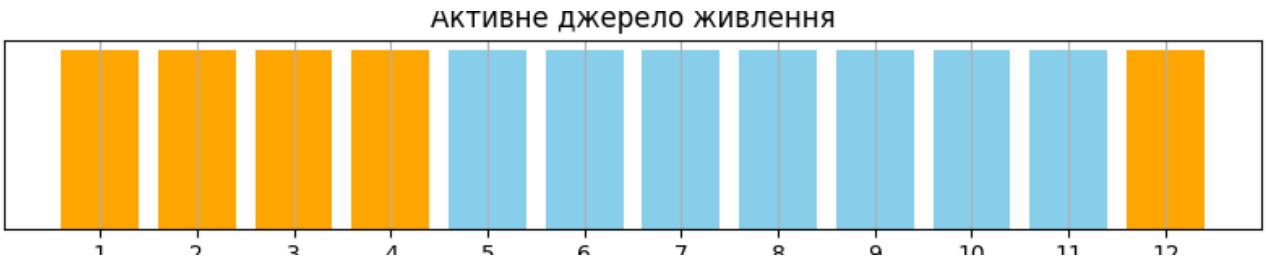
49. Павленко В. М., Пономаренко І. В. Створення мобільних додатків для туристичного ринку // Інтеграція науки і освіти. – Київ: КНУТД, 2022.

50. Павленко В. М., Волівач А. П. Застосування інформаційно-комунікаційних технологій під час викладання технічних спеціальностей // Інтеграція науки і освіти. – Київ: КНУТД, 2022.

ДОДАТКИ

Додаток А

Активне джерело живлення протягом доби

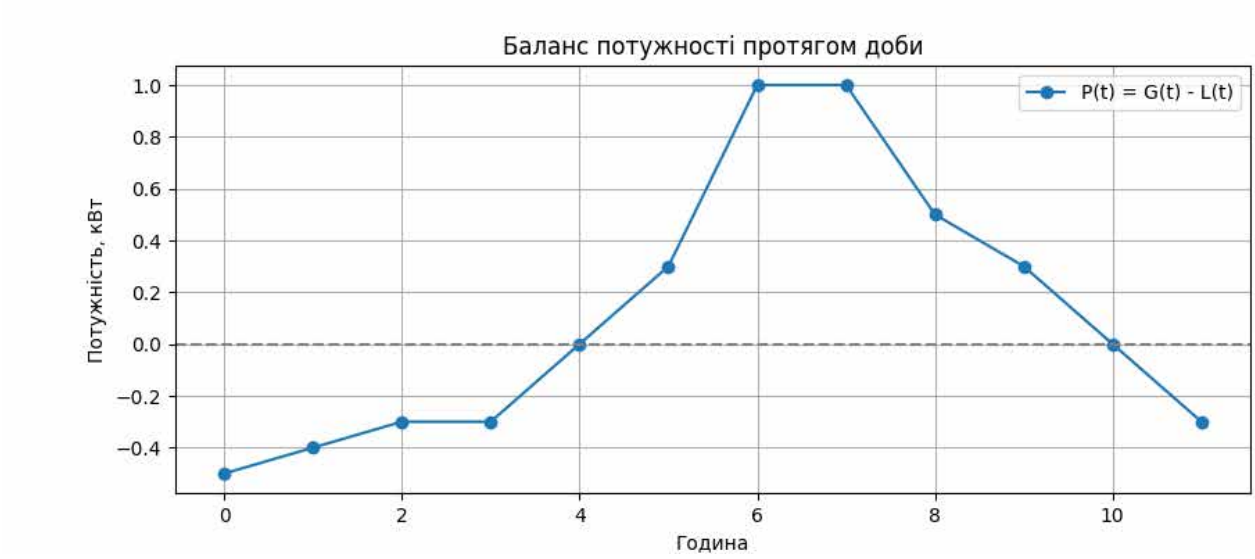


Це графік, який показує активне джерело живлення протягом 12 годин доби. Має два типи кольорів:

Блакитні стовпчики —періоди, коли працює СЕС/ВЕУ (генерація перевищує навантаження)

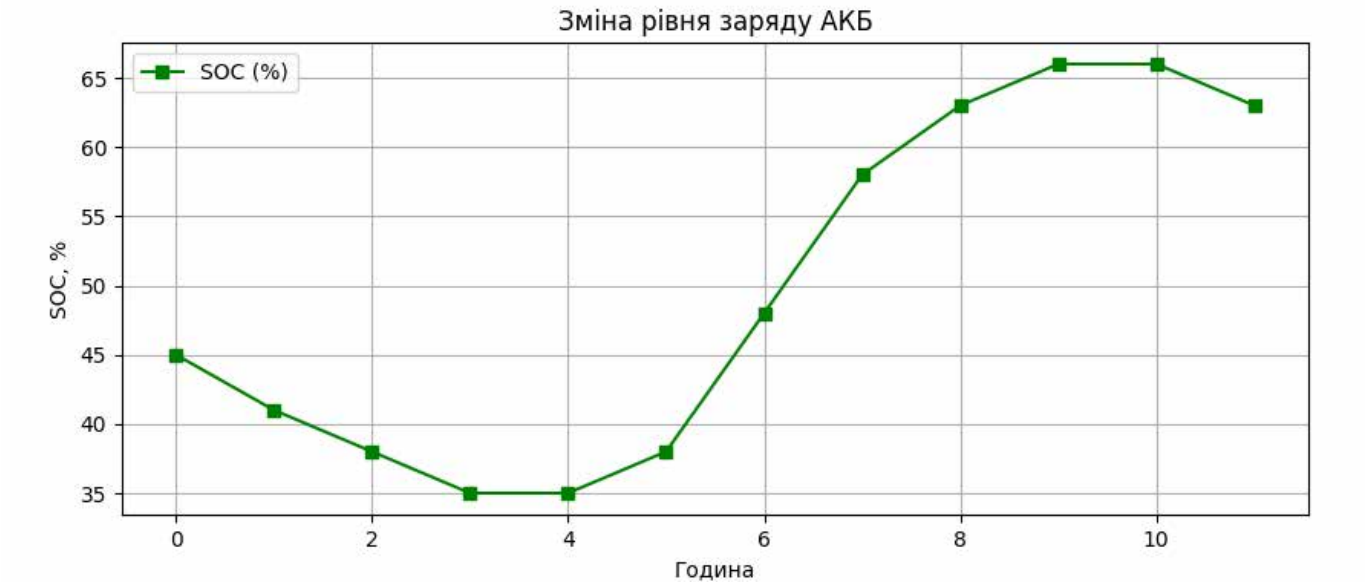
Оранжеві стовпчики — періоди, коли живлення забезпечується з АКБ

Баланс потужності протягом доби



Позитивні значення свідчать про надлишок генерації, негативні — про дефіцит енергії.

Зміна рівня заряду акумуляторної батареї (SOC) протягом доби



Спад у ранкові години, заряд у період надлишкової генерації

Додаток Б

Технічне порівняння елементів комбінованої системи

Таблиця Б1

Порівняння сонячних панелей

Критерій	Jinko Solar Tiger Neo 430W	Longi Hi-MO 5m 450W	Canadian Solar CS6R 440W	Обрано
Тип	Монокристалічні	Монокристалічні	Монокристалічні	Jinko Solar Tiger Neo 430W
ККД	21,5 %	20,9 %	20,5 %	
Гарантія	25 років	25 років	25 років	
Ціна ($/Вт)	0,28	0,3	0,32	
Особливості	N-type, низька деградація	Half-cut, PERC	PERC, PID-захист	

Таблиця Б2

Порівняння вітроустановок

Критерій	Tumo Int 2,5 кВт	Aeolos-H 2 кВт	RWind 3 кВт	Обрано
Тип	Горизонтальна	Вертикальна	Горизонтальна	Tumo Int 2,5 кВт
Мінімальна швидкість вітру	3 м/с	2,5 м/с	3,5 м/с	
ККД	35 %	25 %	30 %	
Ціна ($)	1800	1600	2100	
Особливості	Вбудований контролер	Безшумна робота	Підвищена стійкість	

Таблиця Б3

Порівняння акумуляторних батарей

Критерій	Pylontech US2000C	BYD B-Box LVL	LogicPower LFP 10	Обрано
Тип	$LiFePO_4$	$LiFePO_4$	$LiFePO_4$	Pylontech US2000C
Ємність кВт·год	12,4	15,4	10,0	
Кількість циклів	6500	5500	4000	
Ціна ($)	400	500	350	
Особливості	Модульна система	Висока щільність	Бюджетний варіант	

Таблиця Б4

Обране обладнання для комбінованої системи електропостачання

Компонент	Модель / Виробник	Основні характеристики	Кількість / Обсяг	Примітка
Сонячні панелі (СЕС)	Jinko Solar Tiger Neo 430W	Монокристал, N-type, ККД 21,5 %, 25 років	17 шт. (≈3 кВт)	Висока ефективність
Вітроустановка (ВЕС)	Tumo Int 2,5 кВт	Горизонтальна, старт з 3 м/с, ККД ~35 %	2 шт	Генерація вночі та взимку
Акумуляторна система (АКБ)	Pylontech US2000C	$LiFePO_4$, 2.4 кВт·год, >6000 циклів, ККД ~95 %	4 модулі (9,6 кВт·год)	Модульна, безпечна

Продовження таблиці Б4

Інвертор	Victron MultiPlus-II 48/5000	5 кВт, зарядний/мережевий, підтримка АКБ	1 шт	Сумісний з усіма компонентами
Контролер заряду	Victron SmartSolar MPPT 150/35	MPPT, Bluetooth, для CEC	1 шт	Підвищує ефективність CEC

Додаток В

Обране обладнання

www.jinkosolar.com

Solar JinKO
Building Your Trust in Solar

Tiger Neo N-type 54HL4R-BDV 420-440 Ват

Двосторонній модуль з подвійним склом

N-тип

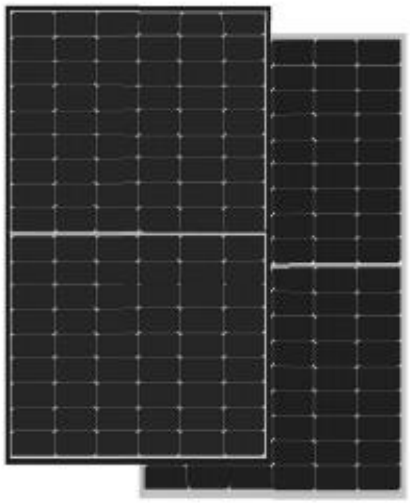
Позитивний допуск потужності 0~+3%

IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Система управління якістю

ISO14001:2015: Система управління навколишнім середовищем

ISO45001:2018
Системи управління охороною праці



Ключові характеристики

SMBB технологія
Покращене уловлювання світла та збирання струму для підвищення вихідної потужності та надійності модуля.

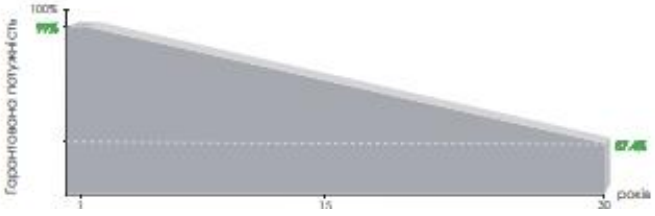
HOT 2.0 технології
Модулі N-типу з технологією JinkoSolar HOT 2.0 забезпечують найкращу надійність та ефективність.

PID опір
Відмінна гарантія ефективності Anti-PID завдяки оптимізованому процесу масового виробництва та контролю матеріалів.

Посилене механічне навантаження
Сертифіковано, щоб витримувати: вітрове навантаження (4000 Па) і снігове навантаження (6000 Па).

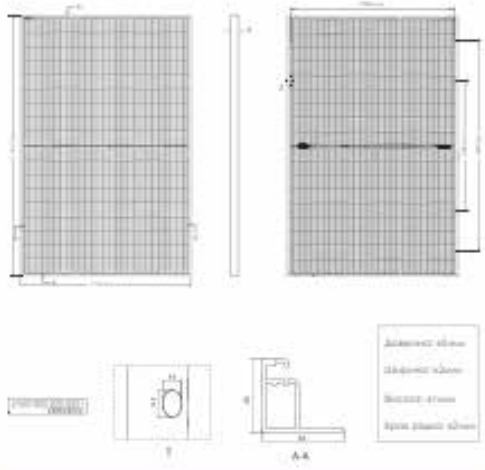
Стійкість до екстремальних умов навколишнього середовища
Висока стійкість до сольового туману та аміаку.

ЛІНІЙНА ГАРАНТІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ

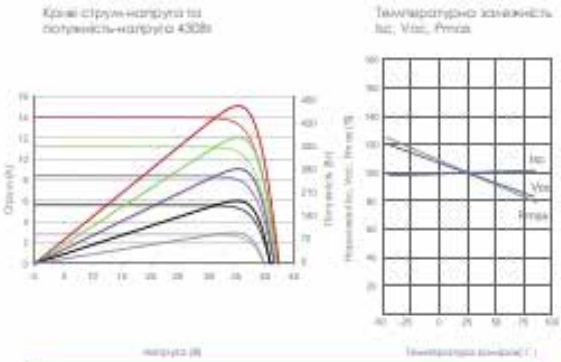


15 років гарантії на продукт
30 років лінійна гарантія
0.40% Щорічна деградація протягом 30 років

Інженерне креслення



Електричні хар-ки та залежність від температури



Конфігурація упаковки

36 штук/пакет; 72 штук/стопка; 936 штук/40'HQ контейнері

Механічні характеристики

Тип комірок	N тип монокристалічні
Кількість комірок	108 (2×54)
Розміри	1762×1134×30мм
Вага	22 кг
Переднє скло	1.6мм, Антибліскове покриття
Заднє скло	1.6мм, Термозміцнене скло
Рама	Анодований алюмінієвий сплав
Розподільна коробка	IP68
Кабелі	TUV 1×4.0мм² (+): 400мм , (-): 200 мм або індивідуально довжина

Характеристики

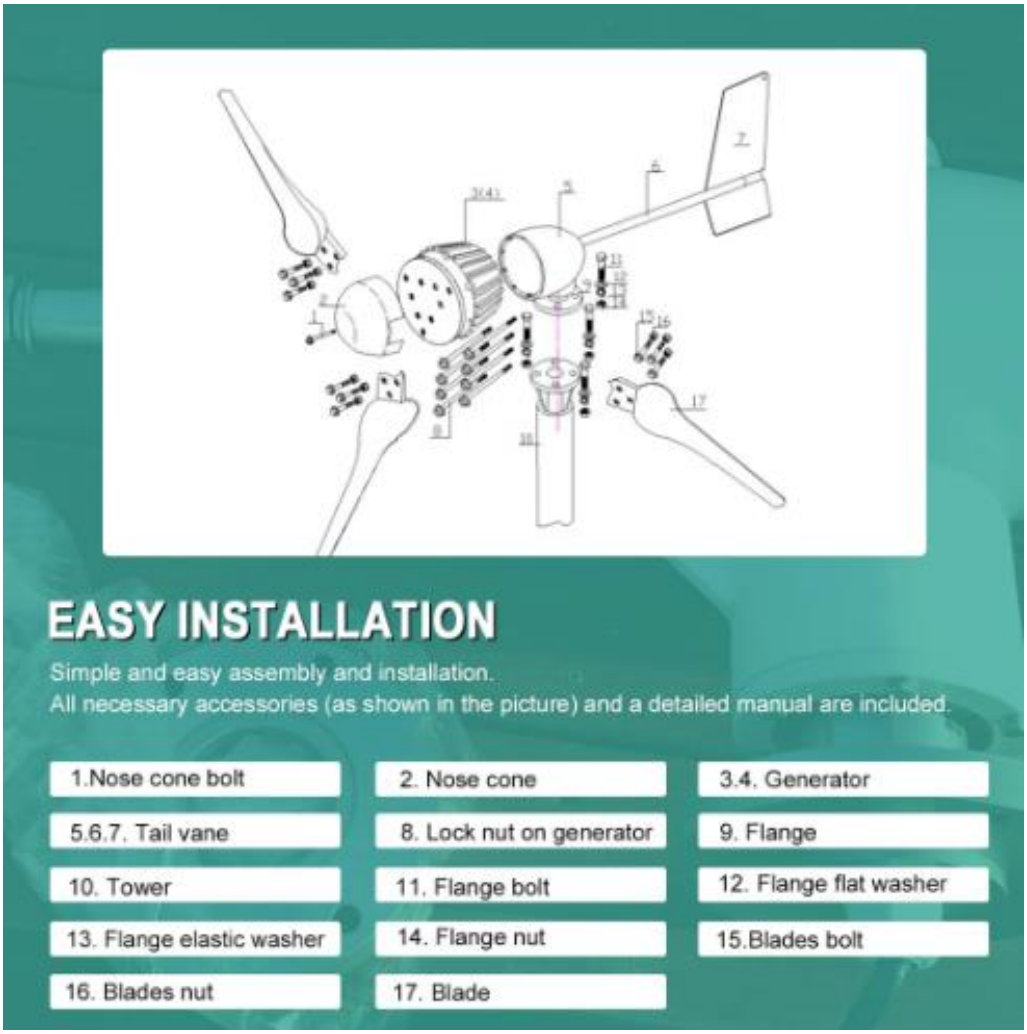
Модель	JKM420N-54HL4R-BDV		JKM425N-54HL4R-BDV		JKM430N-54HL4R-BDV		JKM435N-54HL4R-BDV		JKM440N-54HL4R-BDV	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Максимальна потужність (Pmax)	420Wp	316Wp	425Wp	320Wp	430Wp	323Wp	435Wp	327Wp	440Wp	331Wp
Макс. напруга живлення(Vmp) В	31.48	29.57	31.86	29.73	32.04	29.94	32.23	30.12	32.40	30.27
Макс. сила струму (Imp) А	13.26	10.68	13.34	10.75	13.42	10.80	13.50	10.86	13.58	10.93
Напруга холостого ходу (Voc) В	38.18	36.26	38.38	36.45	38.58	36.64	38.79	36.84	38.98	37.02
Струм короткого замикання (Isc)А	14.03	11.33	14.11	11.39	14.19	11.46	14.27	11.52	14.35	11.59
Модуль ефективності STC (%)	21.02%		21.27%		21.52%		21.77%		22.02%	
Робоча температура(°C)	-40°C~+85°C									
Максимальна напруга системи	1500VDC (IEC)									
Максимальний номінал серії запобіжників	30A									
Толеранс до потужності	0~+3%									
Температурний коефіцієнт Pmax	-0.29%/°C									
Температурний коефіцієнт Voc	-0.25%/°C									
Температурний коефіцієнт Isc	0.045%/°C									
Номінальна робоча температура комірки (NOCT)	45±2°C									
Двосторонній фактор	80±5%									

ДВОЛИЦЬОВИЙ ВИХІД-ПІДСИЛЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ЗАДНЬОГО БОКУ

5%	Макс. потужність (Pmax)	441Wp	446Wp	452Wp	457Wp	462Wp
	Ефективність модуля STC (%)	22.07%	22.33%	22.60%	22.86%	23.12%
15%	Макс. потужність(Pmax)	483Wp	489Wp	495Wp	500Wp	506Wp
	Ефективність модуля STC (%)	24.17%	24.46%	24.75%	25.04%	25.32%
25%	Макс. потужність (Pmax)	525Wp	531Wp	538Wp	544Wp	550Wp
	Ефективність модуля STC (%)	26.27%	26.59%	26.90%	27.21%	27.53%

*STC: Опромінення1000Вт/м² Температура комірки 25°C AM=1.5

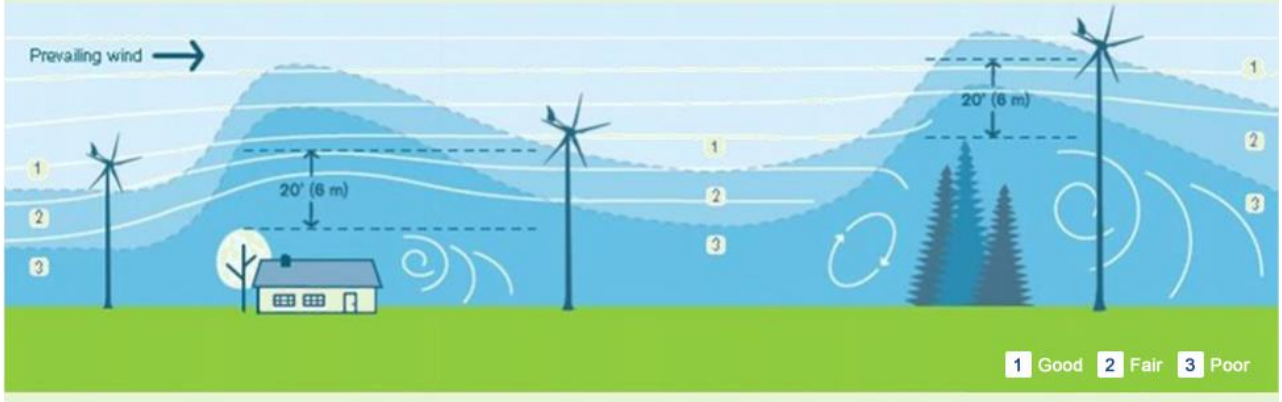
NOCT: Опромінення 800Вт/м² Температура навколишнього середовища 20°C AM=1.5 Швидкість вітру 1м/с

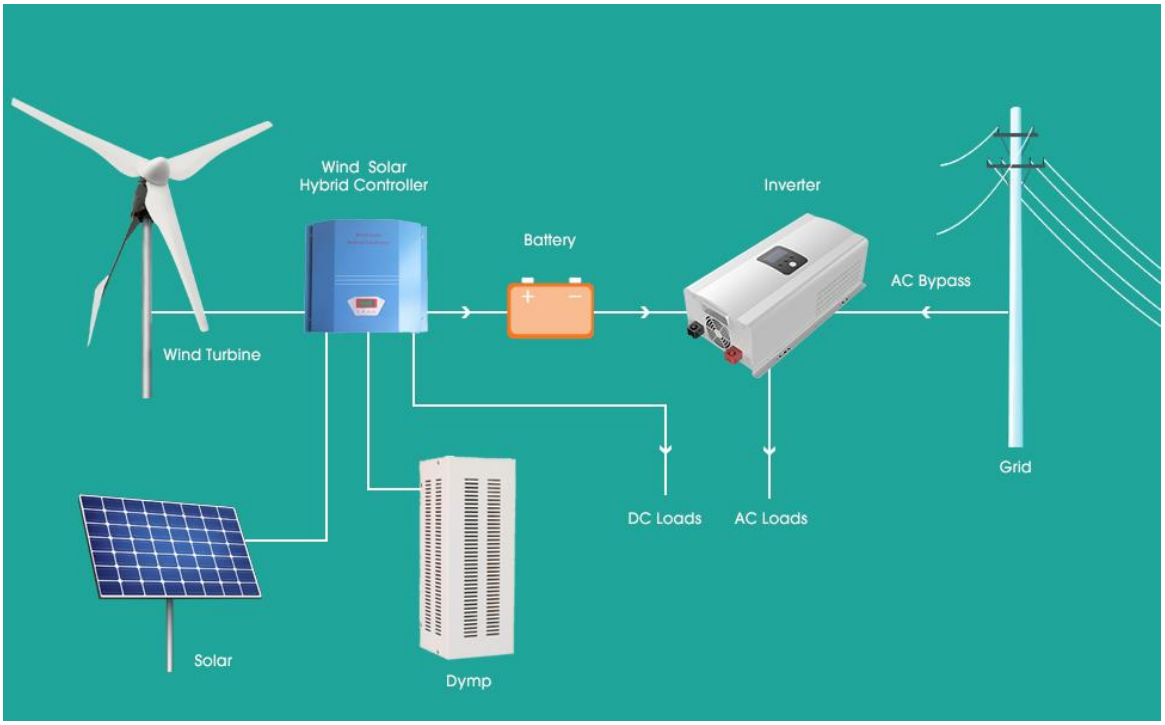


Product Selection

3 blades wind turbine: high rotation rate, perform best in areas rich in wind energy.
5 blades wind turbine: low rotation rate, more stable power generation, perform best in areas lack of wind energy.

The minimum recommended tower height is 20 ft(6 m)on open ground or 20 ft(6 m)above nearby obstructions(refer to following figure)





Акумулятор Pylontech LV 24.0 (24,0 кВт * год, 48 В) US2000C

0 Немає відгуків Арт. 12 363

Характеристики

Тривалість роботи - 6000 циклів до 80%
Вага - 240 кг
Номінальна робоча напруга (Vmp) - 48 В
Бренд - Pylontech
Коефіцієнт ефективності (ККД) % - 90
Усі характеристики

Акумулятор Pylontech LV 24.0 (24,0 кВт * рік, 48 В) US2000C
Весь опис

Всі товари Pylontech | Усі товари категорії

444 589 грн.

Немає у наявності
Розрахувати доставку
Знайшли дешевше?
Хочу у подарунок
Гарантія 7 років

Ціна дійсна лише для інтернет-магазину і може відрізнятись від цін у роздрібних магазинах.

Опис | Відгуки | Характеристики | Документи | Оплата | Доставка

Тривалість роботи	6000 циклів до 80%
Вага	240 кг
Номінальна робоча напруга (Vmp)	48 В
Бренд	Pylontech
Коефіцієнт ефективності (ККД) %	90
Тип АКБ	LiFePO4
Номінальна ємність	24 кВт/рік
Клас захисту	IP20

MultiPlus-II 230V	12/3000/120-32 24/3000/70-32 48/3000/35-32	24/5000/120-50 48/5000/70-50	48/8000/ 110-100	48/10000/ 140-100	48/15000/ 200-100
PowerControl & PowerAssist	Yes				
Transfer switch	32 A	50 A	100 A	100 A	100 A
Maximum AC input current	32 A	50 A	100 A	100 A	100 A
INVERTER					
DC Input voltage range	12V - 9,5–17 V		24V - 19–33V	48V – 38-66 V	
Output	Output voltage: 230 VAC ± 2% Frequency: 50 Hz ± 0,1% (1)				
Cont. output power at 25°C (3)	3000 VA	5000 VA	8000 VA	10000 VA	15000 VA
Cont. output power at 25°C	2400 W	4000 W	6400 W	8000 W	12000 W
Cont. output power at 40°C	2200 W	3700 W	5500 W	7000 W	10000 W
Cont. output power at 65°C	1700 W	3000 W	4000 W	6000 W	7000 W
Max apparent feed-in power	3000 VA	5000 VA	8000 VA	10000 VA	15000 VA
Peak power	5500 W	9000 W	15000 W	18000 W	27000 W
Maximum efficiency	93%/94%/95%	96%	95%	96%	95%
Zero load power	13 / 13 / 11 W	18 W	29 W	38 W	55 W
Zero load power in AES mode	9 / 9 / 7 W	12 W	19 W	27 W	39 W
Zero load power in Search mode	3 / 3 / 2 W	2 W	3 W	4 W	6 W
CHARGER					
AC Input	Input voltage range: 187-265 VAC Input frequency: 45 – 65 Hz				
Charge voltage 'absorption'	14,4 / 28,8 / 57,6 V				
Charge voltage 'float'	13,8 / 27,6 / 55,2 V				
Storage mode	13,2 / 26,4 / 52,8 V				
Max. battery charge current (4)	120 /70 / 35 A	120 / 70 A	110 A	140 A	200 A
Battery temperature sensor	Yes				
GENERAL					
Auxiliary output	Yes (32A)		Yes (50A)		
External AC current sensor (optional)	50A or 100A				
Programmable relay (5)	Yes				
Protection (2)	a – g				
VE.Bus communication port	For parallel (not for 8k, 10k and 15k models) and three phase operation, remote monitoring and system integration				
General purpose com. port	Yes, 2x				
Remote on-off	Yes				
Operating temperature range	-40 to +65°C (fan assisted cooling)				
Humidity (non-condensing)	max 95%				
ENCLOSURE					
Material & Colour	Steel, blue RAL 5012				
Protection category	IP22				
Battery-connection	M8 bolts		Four M8 bolts (2 plus and 2 minus connections)		
230 V AC-connection	Screw terminals 13 mm² (6 AWG)		Bolts M6	Bolts M6	Bolts M6
Weight	19 kg	30 kg	42 kg	49 kg	80 kg
Dimensions (hxwxd) mm	546 x 275 x 147 499 x 268 x 141 499 x 268 x 141	607 x 330 x 149 565 x 320 x 149	642 x 363 x 206	677 x 363 x 206	810 x 405 x 217
STANDARDS					
Safety	EN-IEC 60335-1, EN-IEC 60335-2-29, EN-IEC 62109-1, EN-IEC 62109-2				
Emission, Immunity	EN 55014-1, EN 55014-2 EN-IEC 61000-3-2, EN-IEC 61000-3-3 IEC 61000-6-1, IEC 61000-6-2, IEC 61000-6-3				
Uninterruptible power supply	Please consult the certificates on our website.				
Anti-islanding	Please consult the certificates on our website.				

SmartSolar Charge Controller MPPT 150/35 & 150/45

www.victronenergy.com

SmartSolar Charge Controller MPPT 150/35

Bluetooth Smart built-in
The wireless solution to set-up, monitor, update and synchronise SmartSolar Charge Controllers.

VE.Direct
For a wired data connection to a Color Control GX, other GX products, PC or other devices

Ultrafast Maximum Power Point Tracking (MPPT)
Especially in case of a clouded sky, when light intensity is changing continuously, an ultra-fast MPPT controller will improve energy harvest by up to 30 % compared to PWM charge controllers and by up to 10 % compared to slower MPPT controllers.

Advanced Maximum Power Point Detection in case of partial shading conditions
If partial shading occurs, two or more maximum power points may be present on the power-voltage curve.
Conventional MPPTs tend to lock to a local MPP, which may not be the optimum MPP.
The innovative BlueSolar algorithm will always maximize energy harvest by locking to the optimum MPP.

Outstanding conversion efficiency
No cooling fan. Maximum efficiency exceeds 98 %. Full output current up to 40 °C (104 °F).

Flexible charge algorithm
Fully programmable charge algorithm (see the software page on our website), and eight preprogrammed algorithms, selectable with a rotary switch (see manual for details).

Extensive electronic protection
- Over-temperature protection and power derating when temperature is high.
- PV short circuit and PV reverse polarity protection.
- PV reverse current protection.

Internal temperature sensor
Compensates absorption and float charge voltage for temperature.

Optional external battery voltage and temperature sensing via Bluetooth
A Smart Battery Sense or a BMV-712 Smart Battery Monitor can be used to communicate battery voltage and temperature to one or more SmartSolar Charge Controllers.

Fully discharged battery recovery function
Will initiate charging even if the battery has been discharged to zero volts.
Will reconnect to a fully discharged Li-ion battery with integrated disconnect function.

Bluetooth sensing Smart Battery Sense

Bluetooth sensing BMV-712 Smart Battery Monitor

SmartSolar Charge Controller	MPPT 150/35	MPPT 150/45
Battery voltage	12 / 24 / 48 V Auto Select (software tool needed to select 36 V)	
Rated charge current	35 A	45 A
Nominal PV power 1a, b)	35 A 12 V: 500 W / 24 V: 1000 W / 36 V: 1500 W / 48 V: 2000 W 45 A 12 V: 650 W / 24 V: 1300 W / 36 V: 1950 W / 48 V: 2600 W	
Max. PV short circuit current 2)	40 A	50 A
Maximum PV open circuit voltage	150 V absolute maximum coldest conditions 145 V start-up and operating maximum	
Maximum efficiency	98 %	
Self-consumption	12 V: 20 mA 24 V: 15 mA 48 V: 10 mA	
Charge voltage 'absorption'	Default setting: 14,4 / 28,8 / 43,2 / 57,6 V (adjustable)	
Charge voltage 'float'	Default setting: 13,8 / 27,6 / 41,4 / 55,2 V (adjustable)	
Charge algorithm	multi-stage adaptive (eight pre-programmed algorithms)	
Temperature compensation	-16 mV / -32 mV / -64 mV / °C	
Protection	PV reverse polarity / output short circuit / over-temperature	
Operating temperature	-30 to +60°C (full rated output up to 40°C)	
Humidity	95 %, non-condensing	
Data communication port	VE.Direct See the data communication white paper on our website	
ENCLOSURE		
Colour	Blue (RAL 5012)	
Power terminals	16 mm² / AWG6	
Protection category	IP43 (electronic components), IP22 (connection area)	
Weight	1,25 kg	
Dimensions (h x w x d)	130 x 186 x 70 mm	
STANDARDS		
Safety	EN/IEC 62109-1, UL 1741, CSA C22.2	
STORED TRENDS		
Data stored	Battery voltage,current and temperature, as well as load output current, PV voltage and PV current.	
Number of days trends data is stored	46	

1a) If more PV power is connected, the controller will limit input power.
1b) The PV voltage must exceed Vbat + 5 V for the controller to start.
Thereafter the minimum PV voltage is Vbat + 1 V.
2) A PV array with a higher short circuit current may damage the controller.

Victron Energy B.V. | De Paal 35 | 1351 JG Almere | The Netherlands
E-mail: sales@victronenergy.com | www.victronenergy.com