

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

Максим ЩЕРБА

«__» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою

«Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**на тему: «Розробка та моделювання автономної фотоелектричної
системи електропостачання приватного будинку»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ЕВ-21

Келеп Владислав Олександрович

Керівник: Кандидат технічних наук

Халімовський Олексій Модестович

Рецензент: Старший викладач, кандидат технічних наук

Гаран Ярослав Олександрович

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент 

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Максим ЩЕРБА

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломна робота

1. Тема роботи «Розробка та моделювання автономної фотоелектричної системи електропостачання приватного будинку», керівник роботи Халімовський Олексій Модестович, доцент, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від від від 25.05.2026 р. № 1885-с №_____.

2. Термін подання студентом роботи: 10.06.2026.

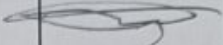
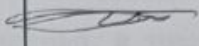
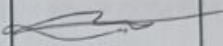
3. Вихідні дані до роботи: приватний житловий будинок із середньодобовим споживанням електроенергії 8 кВт·год; максимальна активна потужність навантаження 1,4 кВт; необхідність забезпечення автономної роботи системи в умовах відсутності або нестабільності централізованого електропостачання; фотоелектричний масив 4 кВт; акумуляторна батарея LiFePO_4 48 В ємністю 250 А·год; інверторне обладнання для живлення побутових споживачів.

4. Зміст пояснювальної записки: вступ; аналіз автономних фотоелектричних систем; проектування автономної фотоелектричної системи електропостачання приватного будинку; розрахунок електричного навантаження, фотоелектричного масиву, акумуляторної батареї та інвертора; техніко-економічна оцінка; розрахунок режимів роботи автономної фотоелектричної системи; аналіз роботи системи у літній, зимовий та похмурий зимовий день; оцінка роботи системи в умовах графіків погодинних відключень; загальні висновки; перелік використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація доповіді (12 слайдів).

6. Дата видачі завдання: 01.05.2026.

Календарний план

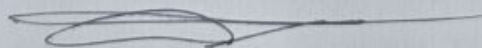
№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз теми, вихідних даних та опрацювання літературних джерел щодо автономних фотоелектричних систем	01.05.2026– 07.05.2026	
2	Дослідження складу автономної ФЕС, принципів роботи фотоелектричного масиву, системи накопичення та інверторного обладнання	08.05.2026– 14.05.2026	
3	Формування переліку електричних споживачів приватного будинку та побудова добового графіка навантаження	15.05.2026– 21.05.2026	
4	Розрахунок потужності фотоелектричної установки, кількості модулів, ємності акумуляторної батареї та вибір інвертора	22.05.2026– 28.05.2026	
5	Виконання техніко-економічної оцінки та моделювання режимів роботи автономної фотоелектричної системи	29.05.2026– 04.06.2026	
6	Аналіз результатів моделювання, підготовка висновків, оформлення графічного матеріалу та переліку джерел	05.06.2026– 08.06.2026	
7	Остаточне оформлення дипломної роботи та підготовка матеріалів до подання	09.06.2026– 10.06.2026	

Студент



Владислав КЕЛЕП

Керівник



Олексій ХАЛІМОВСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 56 сторінках, містить 11 рисунків, 8 таблиць та 14 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – автономна фотоелектрична система електропостачання приватного будинку.

Предмет дослідження – процеси генерації, накопичення, перетворення та розподілу електричної енергії в автономній фотоелектричній системі, а також методи її розрахунку та моделювання.

Мета роботи – проєктування та моделювання роботи автономної фотоелектричної системи електропостачання приватного будинку, визначення її основних параметрів та оцінка ефективності функціонування в умовах змінного навантаження та сонячної генерації.

Результати та їх новизна: проведено аналітичний огляд автономних фотоелектричних систем, визначено склад і принципи роботи основних підсистем, сформовано перелік електричних споживачів приватного будинку та добовий графік навантаження. Розраховано фотоелектричний масив потужністю 4 кВт, акумуляторну батарею LiFePO₄ 48 В ємністю 250 А·год та інверторне обладнання. Розроблено структурну схему автономної системи, виконано техніко-економічну оцінку та моделювання режимів роботи для літнього, зимового і похмурого зимового дня, а також в умовах графіків погодинних відключень.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для попереднього проєктування автономних систем електропостачання приватних будинків та оцінювання їх працездатності в умовах нестабільного електропостачання.

Ключові слова: АВТОНОМНА ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА, СОНЯЧНІ МОДУЛІ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, ІНВЕРТОР, МРРТ-КОНТРОЛЕР, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС, ГРАФІКИ ПОГОДИННИХ ВІДКЛЮЧЕНЬ, ПРИВАТНИЙ БУДИНОК.

ABSTRACT

The thesis consists of 56 pages, contains 11 figures, 8 tables, and 14 references.

Object of research – an autonomous photovoltaic power supply system for a private house.

Subject of research – the processes of generation, storage, conversion, and distribution of electrical energy in an autonomous photovoltaic system, as well as methods for its calculation and modelling.

Purpose of the study – to design and model the operation of an autonomous photovoltaic power supply system for a private house, determine its main parameters, and evaluate its performance under variable load and solar generation conditions.

Results and novelty: an analytical review of autonomous photovoltaic systems was carried out; the composition and operating principles of the main subsystems were determined; a list of electrical consumers of a private house and a daily load profile were formed. A 4 kW photovoltaic array, a 48 V 250 Ah LiFePO₄ battery, and inverter equipment were calculated and selected. A structural diagram of the autonomous system was developed, and a technical and economic assessment was performed. The system operation was modelled for a summer sunny day, a winter design day, a cloudy winter day, and under scheduled power outage conditions.

The practical significance of the study lies in the possibility of using the obtained results for preliminary design of autonomous power supply systems for private houses and for evaluating their operability under unstable electricity supply conditions.

Keywords: AUTONOMOUS PV SYSTEM, SOLAR MODULES, BATTERY STORAGE, INVERTER, MPPT CONTROLLER, ENERGY BALANCE, HOURLY OUTAGE GRAPHICS, PRIVATE HOUSE.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ	12
1.1 Склад автономної ФЕС.....	13
1.2 Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку автономних фотоелектричних систем.....	14
1.3 Аналіз методів розрахунку та моделювання автономних фотоелектричних систем.....	18
Висновки по розділу 1.....	20
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ АВТОНОМНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ.....	22
2.1 Вихідні дані та технічне завдання.....	22
2.2 Аналіз споживання електроенергії в приватному будинку	25
2.2.1 Формування переліку електричних споживачів.....	25
2.2.2 Розробка структурної схеми автономної фотоелектричної системи.....	26
2.2.3 Розрахунок необхідної потужності фотоелектричної установки.....	27
2.2.4 Визначення кількості фотоелектричних модулів.....	28
2.2.5 Розрахунок ємності акумуляторної батареї.....	29
2.2.6 Вибір потужності інвертора.....	31
2.2.7 Вибір кабельних ліній, автоматичних вимикачів та елементів захисту.....	33
2.2.7 Блискавкозахист та захист від імпульсних перенапруг.....	35
2.2.8 Техніко-економічна оцінка системи.....	36
Висновки по розділу 2.....	37
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ.....	39

3.1 Постановка задачі моделювання.....	39
3.2 Вихідні дані для моделювання.....	40
3.3 Математична модель енергетичного балансу системи.....	41
3.4 Формування добових профілів навантаження та сонячної генерації.....	42
3.5 Моделювання роботи системи у літній період.....	44
3.6 Моделювання роботи системи у зимовий період.....	45
3.7 Моделювання роботи системи у похмурий зимовий день.....	46
3.8 Аналіз зміни стану заряду акумуляторної батареї.....	47
3.9 Порівняльний аналіз результатів моделювання.....	48
3.10 Дослідження роботи системи в умовах графіків погодинних відключень.....	49
Висновки по розділу 3.....	50
ВИСНОВКИ.....	52
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АБ – акумуляторна батарея;
- АФЕС – автономна фотоелектрична система електропостачання;
- ГПВ – графіки погодинних відключень;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- ФЕС – фотоелектрична система / фотоелектрична станція;
- АС – змінний струм;
- BMS – Battery Management System, система керування акумуляторною батареєю;
- DC – постійний струм;
- DoD – Depth of Discharge, глибина розряду акумулятора;
- EMS – Energy Management System, система енергоменеджменту;
- LiFePO₄ – літій-залізо-фосфатний акумулятор;
- MPPT – Maximum Power Point Tracking, відстеження точки максимальної потужності;
- PV – Photovoltaic, фотоелектричний;
- SOC – State of Charge, стан заряду акумуляторної батареї;
- SPD – пристрій захисту від імпульсних перенапруг.

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетики характеризується зростанням ролі відновлюваних джерел енергії, підвищенням вимог до енергоефективності та пошуком рішень для забезпечення надійного електропостачання споживачів.

Одним із перспективних напрямків у цій сфері є застосування автономних фотоелектричних систем електропостачання, які дозволяють використовувати сонячну енергію для покриття потреб споживачів без або з мінімальною залежністю від централізованих електричних мереж.

Особливої актуальності впровадження автономних фотоелектричних систем набуває в умовах нестабільності зовнішнього електропостачання, застосування графіків погодинних відключень, аварійних обмежень та зниження якості електроенергії. Для приватних житлових будинків це створює ризики порушення роботи систем освітлення, опалення, водопостачання, зв'язку та інших критично важливих електроприймачів. У таких умовах автономні фотоелектричні системи можуть розглядатися не лише як засіб зниження витрат на електроенергію, а і як інструмент підвищення енергетичної незалежності та резервування живлення.

Розробка автономної фотоелектричної системи потребує визначення оптимальних параметрів фотоелектричного масиву, системи накопичення енергії, інверторного обладнання та систем керування. Важливим етапом є також моделювання функціонування такої системи у різних режимах роботи, що дозволяє оцінити її ефективність, надійність та техніко-економічну доцільність.

Метою роботи є проєктування та моделювання роботи автономної фотоелектричної системи електропостачання приватного будинку, визначення її основних параметрів та оцінка ефективності функціонування в умовах змінного навантаження та сонячної генерації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз літератури за темою автономних фотоелектричних систем;
- дослідити принципи побудови автономних фотоелектричних систем;
- виконати розрахунок електричного навантаження приватного будинку;

- розрахувати потужність фотоелектричного масиву, параметри акумуляторної батареї та інвертора;
- розробити структурну схему автономної фотоелектричної системи;
- виконати моделювання функціонування системи у різних режимах роботи;
- оцінити ефективність роботи розробленої системи.

Об'єктом дослідження є автономна фотоелектрична система електропостачання приватного будинку.

Предметом дослідження є процеси генерації, накопичення, перетворення та розподілу електричної енергії в автономній фотоелектричній системі, а також методи її розрахунку та моделювання.

У роботі використано такі методи дослідження: аналітичні методи розрахунку параметрів фотоелектричних систем, методи енергетичного балансу, чисельне моделювання режимів роботи системи, а також методи техніко-економічної оцінки.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для проєктування автономних систем електропостачання приватних будинків та оцінки їх працездатності в умовах нестабільного електропостачання.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

Автономні фотоелектричні системи електропостачання (АФЕС) є одним із перспективних напрямків розвитку розподіленої енергетики, що дозволяє забезпечити електропостачання споживачів без підключення до централізованих мереж [1, 2]. Основою функціонування таких систем є перетворення сонячної енергії у електричну з подальшим її накопиченням та використанням відповідно до потреб споживача [3].

В умовах сучасного стану енергетичної системи України особливої актуальності набуває питання забезпечення надійного та безперервного електропостачання побутових споживачів. Зокрема, впровадження графіків погодинних відключень (ГПВ), аварійних обмежень та нестабільності параметрів електричної мережі (просідання напруги, частотні відхилення) суттєво знижує якість електропостачання та створює ризики для функціонування побутових і інженерних систем будинку.

У таких умовах автономні фотоелектричні системи розглядаються не лише як альтернатива централізованому електропостачанню, але і як ефективний засіб підвищення енергетичної незалежності та надійності електрозабезпечення.

Використання акумуляторних накопичувачів у складі АФЕС дозволяє забезпечити:

- покриття навантаження під час дії графіків відключень;
- згладжування пікових навантажень;
- резервування критично важливих споживачів (системи опалення, водопостачання, зв'язку);
- стабілізацію параметрів електроживлення.

Крім того, застосування автономних або гібридних фотоелектричних систем дозволяє частково або повністю компенсувати дефіцит електроенергії у періоди обмеження електропостачання, що є особливо актуальним для приватних житлових будинків, розташованих у районах із підвищеним рівнем енергетичної нестабільності.

1.2 Склад автономної ФЕС

Структура автономної фотоелектричної системи електропостачання визначається необхідністю забезпечення повного циклу перетворення, накопичення та розподілу електричної енергії в умовах відсутності централізованого живлення. На відміну від мережевих систем, автономна система повинна самостійно підтримувати баланс потужності та енергії в усіх режимах роботи.

Типова структура АФЕС включає в себе наступні елементи:

- система генерації;
- система керування і моніторингу;
- система накопичення;
- інверторна система.

Узагальнену структуру автономної фотоелектричної системи, сформовану на основі джерел [2, 3], наведено на рисунку 1.1.

DC COUPLED - GRID TIED

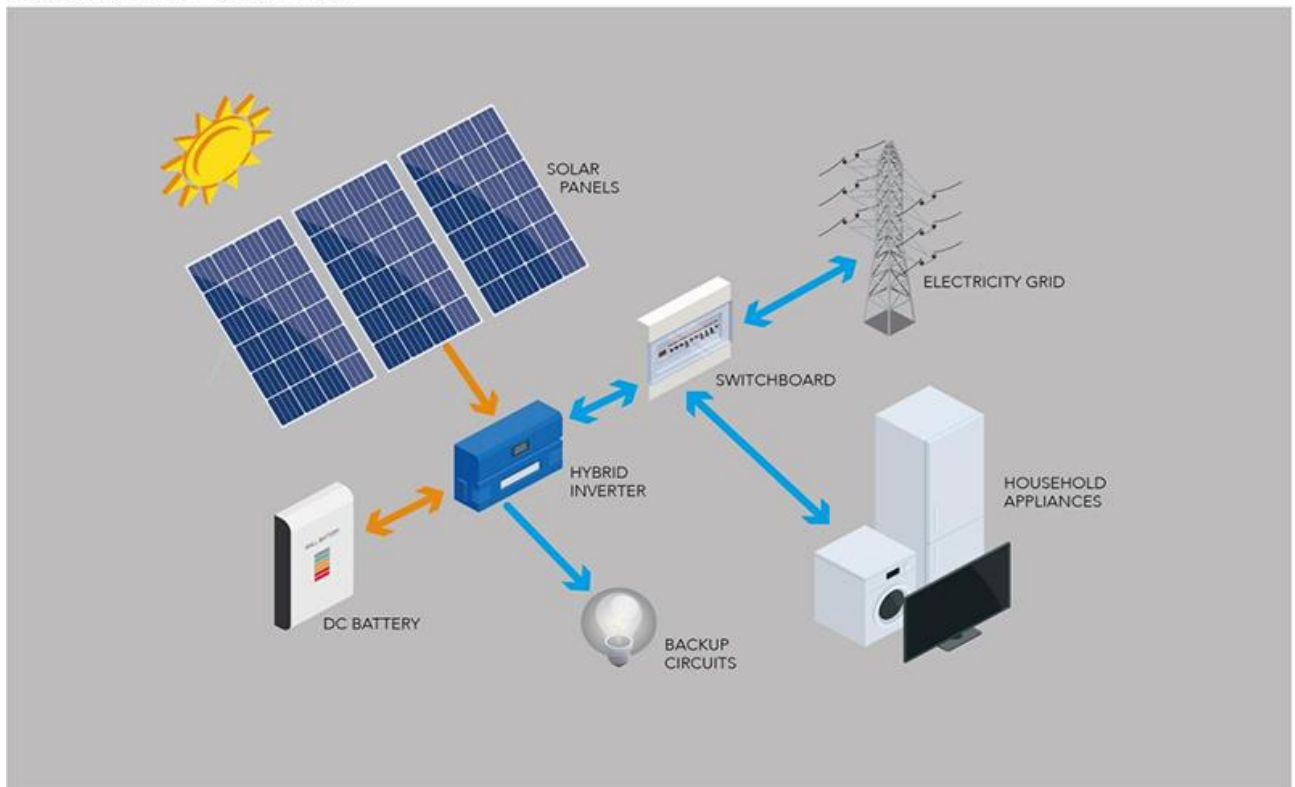


Рисунок 1.1 – Узагальнена структура АФЕС

Система генерації є первинним джерелом електричної енергії в автономній фотоелектричній системі та реалізується на основі фотоелектричних модулів, які перетворюють сонячну радіацію в електричну енергію постійного струму.

Основними складовими системи генерації є:

- фотоелектричні модулі;
- монтажні конструкції;
- кабельні з'єднання та комутаційні елементи.

Ефективність роботи системи визначається такими факторами:;

- орієнтацією та кутом нахилу модулів;
- наявністю затінення.

Особливістю фотоелектричної генерації є її стохастичний характер, що обумовлює необхідність інтеграції накопичувачів енергії. У реальних умовах потужність генерації змінюється протягом доби та сезону, що потребує коректного підбору встановленої потужності PV-масиву з урахуванням коефіцієнта запасу.

Система керування і моніторингу забезпечує узгоджену роботу всіх компонентів автономної системи та оптимізацію енергетичних потоків.

До її складу входять:

- контролер заряду;
- система збору та обробки даних;
- програмне забезпечення моніторингу;
- комунікаційні інтерфейси.

Контролер заряду виконує ключові функції:

- відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного масиву;
- регулювання процесів заряджання акумуляторів;
- захист від перенапруги, перевантаження та короткого замикання.

Система моніторингу дозволяє:

- контролювати параметри генерації, споживання та накопичення;
- аналізувати ефективність роботи системи;
- здійснювати дистанційне керування.

У сучасних системах застосовуються елементи енергоменеджменту (EMS), що дозволяють:

- оптимізувати використання енергії;
- реалізувати пріоритети навантажень;
- адаптувати систему до змін режимів (зокрема при ГПВ).

Система накопичення визначає рівень автономності системи в цілому, оскільки саме від ємності акумуляторної батареї залежить тривалість безперервного електропостачання споживачів при відсутності генерації. У загальному вигляді тривалість автономної роботи може бути оцінена як відношення доступної енергії акумулятора до потужності навантаження. При цьому доступна енергія залежить не лише від номінальної ємності батареї, але й від допустимої глибини розряду, коефіцієнта корисної дії процесів заряджання та розряджання, а також технічного стану акумуляторів [4].

До складу системи накопичення входять акумуляторні батареї, система керування батареєю (Battery Management System, BMS), а також захисні та комутаційні елементи [5]. BMS відіграє критично важливу роль у забезпеченні надійної та безпечної роботи акумуляторів, здійснюючи контроль напруги, струму та температури окремих комірок, їх балансування, а також захист від аварійних режимів, таких як перезаряд, глибокий розряд або перегрів [6]. У сучасних системах накопичення, особливо на базі літій-іонних технологій, BMS є обов'язковим елементом, без якого експлуатація системи є неможливою [7].

Залежно від типу застосованих акумуляторів розрізняють свинцево-кислотні та літій-іонні системи накопичення. Свинцево-кислотні акумулятори характеризуються відносно низькою вартістю та простотою експлуатації, однак мають обмежений ресурс роботи, невисоку глибину розряду та нижчий коефіцієнт корисної дії [5]. Літій-іонні акумулятори, зокрема літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4), відзначаються значно вищим ресурсом циклів, більшою допустимою глибиною розряду, високим ККД та кращими масо-габаритними показниками, що обумовлює їх широке застосування у сучасних автономних системах електропостачання [7, 8].

Основними параметрами системи накопичення є ємність акумуляторної батареї, глибина розряду, коефіцієнт корисної дії та ресурс циклів [2]. Ємність акумулятора визначається виходячи з добового споживання електроенергії та необхідної тривалості автономної роботи, з урахуванням допустимої глибини розряду та втрат у системі [9]. Важливим експлуатаційним параметром є стан заряду акумулятора (State of Charge, SOC), який характеризує відношення поточного запасу енергії до номінальної ємності, а також глибина розряду (Depth of Discharge, DoD), що визначає ступінь використання ємності акумулятора [4, 5].

В умовах нестабільного електропостачання, зокрема при застосуванні графіків погодинних відключень, роль системи накопичення суттєво зростає [10]. Вона забезпечує резервне електроживлення під час відключення мережі, дозволяє накопичувати електроенергію у періоди її доступності та використовувати її у періоди дефіциту, а також підтримує живлення критично важливих споживачів, таких як системи опалення, водопостачання та освітлення [10]. У таких умовах система накопичення фактично виконує функції джерела безперебійного живлення, забезпечуючи миттєве переключення на автономний режим роботи без перерви в електропостачанні [6].

Ефективність системи накопичення визначається сукупністю втрат, що виникають у процесах заряджання та розряджання, а також внаслідок саморозряду та теплових процесів [4]. Сумарні втрати можуть досягати 10–20%, що необхідно враховувати при розрахунку параметрів системи [4]. Крім того, з часом відбувається деградація акумуляторів, що призводить до зменшення їх ємності та потребує закладання додаткового резерву при проєктуванні [8].

1.2 Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку автономних фотоелектричних систем

Аналіз сучасних досліджень у сфері автономних фотоелектричних систем електропостачання показує, що даний напрямок є одним із найбільш динамічних у галузі відновлюваної енергетики. Основний акцент сучасних наукових робіт

зміщується від базових принципів побудови систем до оптимізації їх ефективності, підвищення надійності та адаптації до реальних умов експлуатації.

Одним із ключових напрямків досліджень є оптимізація структури та параметрів автономних систем. У роботах [2, 9] зазначається, що традиційний підхід до проектування, заснований на усереднених значеннях навантаження та інсоляції, не забезпечує необхідного рівня точності. Сучасні методи передбачають використання погодинних графіків навантаження та метеорологічних даних, що дозволяє значно підвищити ефективність системи та зменшити її вартість.

Іншим важливим напрямком є розвиток систем накопичення енергії. Згідно з дослідженнями [5–8], саме акумуляторні системи є найбільш вразливим та дорогим елементом автономних систем. У зв'язку з цим активно впроваджуються нові технології, зокрема літій-залізо-фосфатні акумулятори, які характеризуються високим ресурсом, ефективністю та безпекою.

Особлива увага приділяється питанням енергоменеджменту. У сучасних системах застосовуються алгоритми керування, що дозволяють:

- оптимізувати розподіл енергії між споживачами;
- мінімізувати втрати;
- забезпечити пріоритетне живлення критичних навантажень.

Це особливо актуально в умовах нестабільного електропостачання, коли система повинна адаптуватися до змінних режимів роботи.

Суттєвим фактором розвитку автономних систем є зовнішні умови експлуатації. В умовах України, де спостерігається нестабільність електропостачання та застосовуються графіки погодинних відключень, автономні фотоелектричні системи набувають додаткового значення як засіб забезпечення енергетичної безпеки домогосподарств.

У цьому контексті сучасні дослідження спрямовані на:

- підвищення рівня автономності систем;
- інтеграцію функцій резервного живлення;

- розробку гібридних систем із можливістю роботи як в автономному, так і в мережевому режимі.

1.3 Аналіз методів розрахунку та моделювання автономних фотоелектричних систем

Розрахунок та моделювання автономних фотоелектричних систем електропостачання є одним із ключових етапів їх проектування, що визначає ефективність, надійність та економічну доцільність системи. На відміну від традиційних енергетичних систем, автономні фотоелектричні системи характеризуються високим рівнем невизначеності, пов'язаним із змінністю генерації та нерівномірністю споживання електроенергії, що обумовлює необхідність застосування спеціалізованих методів моделювання [2, 3].

Сучасні підходи до розрахунку автономних систем базуються на аналізі енергетичного балансу, який враховує співвідношення між генерацією, споживанням та накопиченням електроенергії. Основним завданням є визначення таких параметрів системи, які забезпечують покриття навантаження з заданим рівнем надійності при мінімальних витратах [9].

Одним із базових методів є енергетичний метод розрахунку, що передбачає використання середньодобових або середньомісячних значень інсоляції та споживання електроенергії. У рамках цього підходу визначається необхідна потужність фотоелектричного масиву та ємність акумуляторної батареї. Проте даний метод має обмежену точність, оскільки не враховує погодинні коливання генерації та навантаження.

Більш точним є метод погодинного моделювання, який базується на використанні часових рядів даних про сонячну радіацію та споживання електроенергії. Такий підхід дозволяє:

- врахувати реальні режими роботи системи;
- оцінити дефіцит енергії;
- визначити рівень автономності.

У сучасних дослідженнях широко застосовуються спеціалізовані програмні комплекси для моделювання фотоелектричних систем. Одним із

найбільш поширених є програмний продукт HOMER, який дозволяє виконувати техніко-економічну оптимізацію автономних енергетичних систем [9]. Він забезпечує можливість аналізу різних конфігурацій системи, оцінки вартості електроенергії та визначення оптимальних параметрів.

Іншим важливим інструментом є MATLAB/Simulink, який використовується для детального моделювання динамічних процесів у фотоелектричних системах [3]. З його допомогою можна досліджувати роботу MPPT-контролерів, інверторів та акумуляторних систем у різних режимах.

Також широко використовується програмний комплекс PVsyst, що орієнтований на інженерне проектування фотоелектричних систем. Він дозволяє враховувати:

- географічні та кліматичні умови;
- параметри обладнання;
- втрати в системі.

Сучасні методи моделювання також передбачають використання оптимізаційних алгоритмів, зокрема методів лінійного та нелінійного програмування, які дозволяють визначити оптимальні параметри системи з урахуванням технічних та економічних обмежень.

Особливої актуальності набуває моделювання автономних систем в умовах нестабільного електропостачання. У таких випадках необхідно враховувати:

- графіки погодинних відключень;
- змінні режими роботи навантаження;
- необхідність резервування критичних споживачів.

Це призводить до необхідності використання сценарного підходу, при якому аналізуються різні режими роботи системи, зокрема:

- нормальний режим;
- режим відключення мережі;
- режим пікового навантаження.

Таким чином, сучасні методи розрахунку та моделювання автономних фотоелектричних систем базуються на комплексному підході, що поєднує

аналітичні розрахунки, чисельне моделювання та оптимізаційні методи. Їх застосування дозволяє забезпечити високий рівень точності розрахунків та адаптацію системи до реальних умов експлуатації.

Висновки по розділу 1

У результаті проведеного аналізу інформаційних джерел встановлено, що автономні фотоелектричні системи електропостачання є ефективним та перспективним рішенням для забезпечення електроенергією приватних будинків, особливо в умовах відсутності або нестабільності централізованого електропостачання.

Визначено, що структура автономної фотоелектричної системи включає чотири основні підсистеми: генерації, керування і моніторингу, накопичення та перетворення електричної енергії. Ефективність функціонування системи залежить від узгодженої роботи всіх її елементів, а також від правильного вибору їх параметрів.

Показано, що найбільш критичним елементом автономної системи є система накопичення енергії, яка визначає рівень автономності та надійності електропостачання. При цьому сучасні тенденції розвитку вказують на доцільність використання літій-іонних акумуляторів, що забезпечують вищу ефективність та довговічність у порівнянні з традиційними технологіями.

Аналіз сучасного стану досліджень показав, що основна увага приділяється оптимізації параметрів автономних систем, підвищенню їх енергоефективності. Особливо актуальними є задачі забезпечення надійності електропостачання в умовах нестабільної роботи електричних мереж та застосування графіків погодинних відключень.

Встановлено, що традиційні методи розрахунку, засновані на використанні усереднених значень параметрів, не забезпечують достатньої точності для сучасних умов експлуатації. У зв'язку з цим доцільним є застосування методів погодинного моделювання, які дозволяють врахувати змінність генерації фотоелектричної системи та нерівномірність споживання електроенергії.

Показано, що використання сучасних програмних засобів моделювання, таких як HOMER, MATLAB/Simulink та PVsyst, дозволяє виконувати комплексний аналіз роботи автономних фотоелектричних систем, оцінювати їх техніко-економічні показники та визначати оптимальні параметри системи з урахуванням реальних умов експлуатації.

Таким чином, ефективне проєктування автономної фотоелектричної системи електропостачання повинно базуватися на комплексному підході, що поєднує аналітичні розрахунки, чисельне моделювання та оптимізацію параметрів системи. Це дозволяє забезпечити необхідний рівень надійності, енергоефективності та автономності системи.

РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ АВТОНОМНОЇ ФОТО-ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ

2.1 Вихідні дані та технічне завдання

Об'єктом проєктування є автономна фотоелектрична система електропостачання приватного житлового будинку, яка призначена для забезпечення живлення споживачів у двох можливих умовах: за повної відсутності підключення до централізованої мережі або за наявності мережі з нестабільними параметрами та періодичними відключеннями.

Проектowana система повинна працювати в автономному режимі, забезпечуючи живлення електроприймачів за рахунок генерації сонячної енергії та її накопичення в акумуляторній батареї. При цьому система розглядається як локальне джерело електроенергії, яке функціонує незалежно від зовнішньої електричної мережі.

Основними вимогами до системи є:

- автономність роботи – забезпечення електроживлення без підключення до централізованої мережі протягом заданого часу;
- надійність електропостачання – гарантоване живлення критично важливих споживачів у будь-яких режимах роботи системи;
- працездатність в умовах ГПВ – здатність системи компенсувати повну втрату зовнішнього живлення;
- енергоефективність – мінімізація втрат енергії при її перетворенні, накопиченні та передачі;
- масштабованість та гнучкість – можливість подальшого збільшення потужності системи або ємності накопичувачів без суттєвої зміни структури;
- економічна доцільність – оптимальне співвідношення вартості системи та її енергетичної ефективності.

Для розрахунку параметрів системи приймається типовий приватний житловий будинок із середнім рівнем енергоспоживання. Електричне навантаження будинку формується з урахуванням характерних груп споживачів, які відрізняються за режимом роботи, потужністю та рівнем чутливості до перерв електропостачання.

До основних категорій споживачів належать:

- освітлювальні прилади, що забезпечують базові умови проживання та мають нерівномірний графік роботи (переважно у вечірній та нічний час);
- побутова техніка (чайники, мікрохвильові печі, пральні машини тощо), яка характеризується короткочасними піковими навантаженнями;
- холодильне обладнання, яке працює циклічно та належить до критичних споживачів;
- насосне обладнання (системи водопостачання, опалення), що є важливим для забезпечення життєдіяльності будинку;
- системи зв'язку та безпеки (роутери, сигналізація, відеонагляд), які повинні працювати безперервно.

З метою підвищення надійності електропостачання всі споживачі доцільно розділити на дві групи:

- критичні навантаження, які повинні житися в будь-яких умовах (освітлення, холодильник, зв'язок, насоси);
- некритичні навантаження, які можуть бути обмежені або відключені у разі дефіциту енергії (частина побутової техніки, допоміжні пристрої).

Такий підхід дозволяє оптимізувати параметри автономної системи, зменшити необхідну встановлену потужність фотоелектричної установки та ємність акумуляторної батареї, а також підвищити загальну ефективність її роботи.

При розробці системи також враховується нерівномірність сонячної генерації протягом доби та сезонні коливання інсоляції, що обумовлює необхідність використання накопичувачів енергії. Основною задачею проектування є забезпечення балансу між генерацією, споживанням та

накопиченням електроенергії з мінімальними втратами та відсутністю дефіциту енергії для критичних споживачів.

Таким чином, постановка задачі полягає у визначенні оптимальних параметрів автономної фотоелектричної системи (потужності фотоелектричних модулів, ємності акумуляторної батареї та параметрів інвертора), які забезпечать надійне електропостачання приватного будинку при заданому профілі навантаження та умовах сонячної генерації.

2.2 Аналіз споживання електроенергії в приватному будинку

2.2.1 Формування переліку електричних споживачів

Для визначення параметрів автономної фотоелектричної системи необхідно виконати аналіз електричного навантаження об'єкта. Навантаження приватного житлового будинку формується сукупністю побутових споживачів, які відрізняються за потужністю, режимом роботи та тривалістю використання.

До складу електричних споживачів включено типові обладнання, що характерне для сучасного житлового будинку, та наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристика споживання електроенергії в будинку

№	Найменування споживачів	Потужність електроустановки, кВт	Кількість	Сумарна потужність, кВт	Час роботи, год/добу	Добове споживання, кВт·год
1	Освітлення	0,01	20,00	0,20	5,00	1,00
2	Холодильник	0,15	1,00	0,15	8 (екв)	1,20
3	Телевізор	0,10	1,00	0,10	4,00	0,40
4	Ноутбук	0,05	2,00	0,10	5,00	0,50
5	Роутер	0,01	1,00	0,01	24,00	0,24
6	Пральна машина	2,00	1,00	2,00	1,00	2,00
7	Електрочайник	2,00	1,00	2,00	0,50	1,00
8	Мікрохвильова піч	1,20	1,00	1,20	0,30	0,36
9	Насос водопостачання	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50
10	Циркуляційний насос	0,10	1,00	0,10	8,00	0,80

Сумарна встановлена потужність споживачів складає 6,36 кВт, тоді як добове споживання становить 8 кВт·год. Максимальна потужність навантаження у вечірній період досягає 1,4 кВт. Добовий профіль навантаження, побудований на основі розрахункових даних таблиці 2.1, наведено на рисунку 2.1.

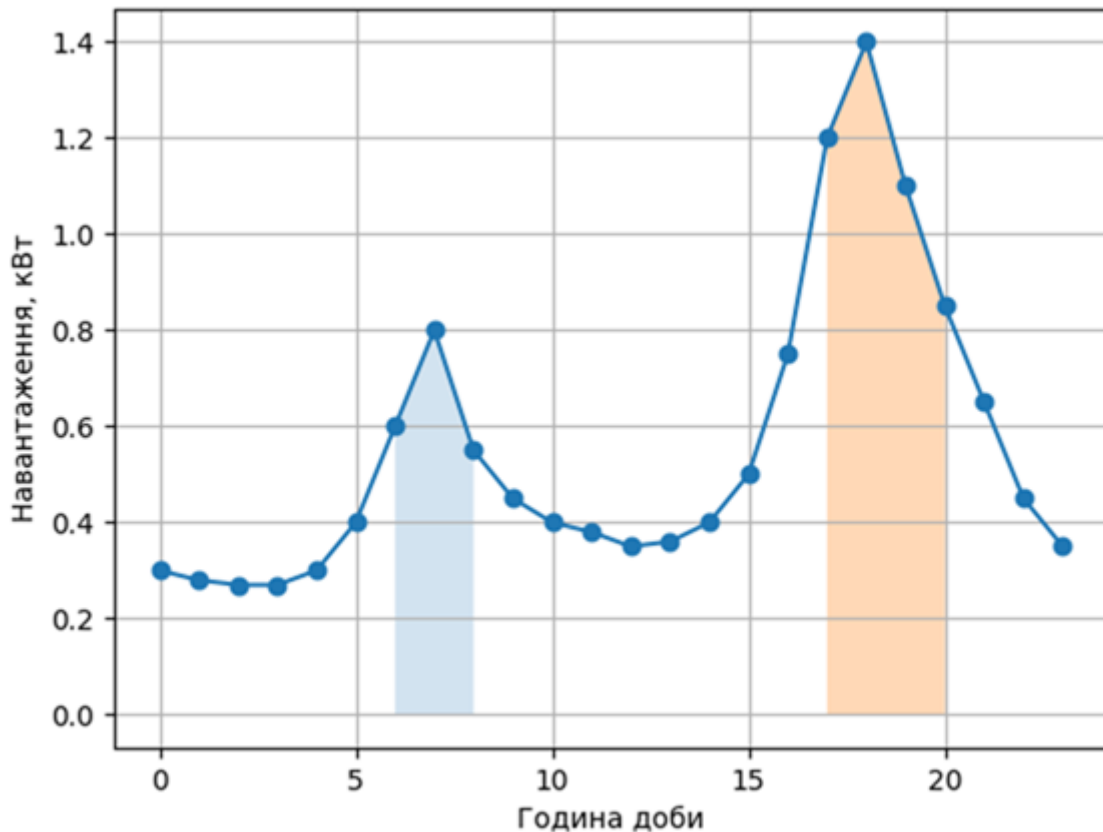


Рисунок 2.1 – Добовий графік навантаження будинку (за даними таблиці 2.1)

Навантаження має нерівномірний характер та включає:

- базове постійне навантаження (роутер, холодильник);
- циклічне навантаження (насоси);
- пікове побутове навантаження (чайник, мікрохвильова піч).

За ступенем пріоритетності електроприймачі будинку поділяються на дві групи:

1) критичні навантаження:

- освітлення;
- холодильник;
- роутер;
- насоси.

2) некритичні навантаження:

- пральна машина;
- чайник;
- мікрохвильова піч.

Такий поділ дозволяє зменшити вимоги до автономного резерву в аварійних режимах.

2.2.2. Розробка структурної схеми автономної фотоелектричної системи

Автономна система будується за класичною структурою off-grid типу. До її складу входять:

- фотоелектричний масив;
- МРРТ-контролер заряду;
- акумуляторна батарея 48 В;
- автономний інвертор;
- розподільчий щит навантажень;
- захисні апарати DC та AC сторін.

Структурна схема системи включає послідовність перетворення енергії: фотоелектричні модулі, МРРТ-контролер, акумуляторна батарея, інвертор, навантаження. Приклад схеми наводиться на рисунку 2.2.

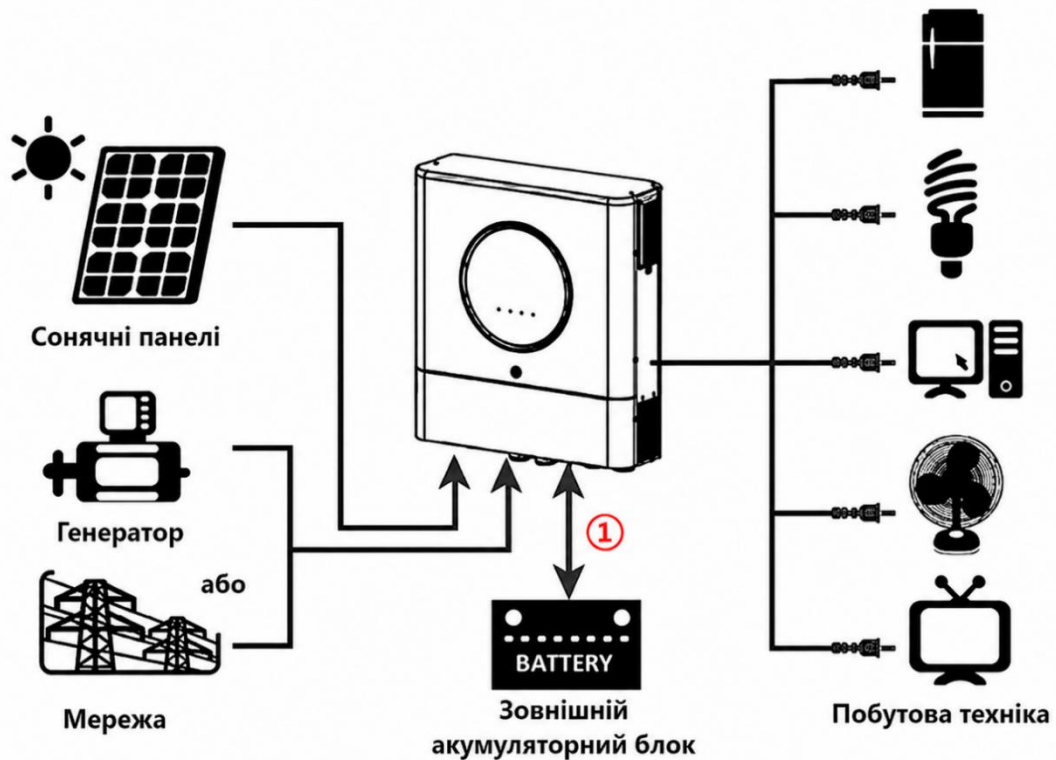


Рисунок 2.2 – Приклад типової схеми АФЕС

У нормальному режимі електроенергія від PV-масиву спрямовується одночасно на живлення навантаження та заряд акумулятора. У разі відсутності генерації живлення забезпечується від акумуляторної батареї. Для підвищення надійності передбачаються:

- DC автоматичний вимикач;
- запобіжники string-захисту;
- захист від імпульсних перенапруг (SPD);
- система заземлення.

2.2.3 Визначення кількості фотоелектричних модулів

Для подальшого розрахунку приймаються такі дані:

- добове споживання будинку $E_{day} = 8 \text{ кВт} \cdot \text{год}$;
- середня тривалість ефективної сонячної генерації $H = 4 \text{ год}$;
- сумарний коефіцієнт корисної дії фотоелектричної системи з урахуванням втрат у модулях, кабельних лініях, контролері та інверторі $\eta = 0,75$.

Необхідна встановлена потужність фотоелектричної станції визначається виходячи з умови забезпечення добового споживання електроенергії за рахунок сонячної генерації. Узагальнений розрахунок виконується за формулою:

$$P_{PV} = \frac{E_{day}}{H \cdot \eta} = \frac{8}{4 \cdot 0,75} = 2,67 \text{ кВт};$$

Отже, мінімально необхідна потужність фотоелектричної установки для компенсації середньодобового споживання становить приблизно 2,7 кВт. Проте для автономної системи цього значення недостатньо в практичному сенсі, оскільки:

- сонячна генерація є нерівномірною впродовж доби;
- реальні погодні умови можуть суттєво відрізнятися від середніх;
- частина енергії повинна використовуватися не лише на поточне навантаження, а й на заряд акумуляторної батареї;
- у зимовий період виробіток ФЕС зменшується.

Тому при проектуванні доцільно вводити резерв за потужністю. Якщо прийняти запас на рівні 50 %, рекомендована встановлена потужність складе:

$$P_{PV} = 2,7 \cdot 1,5 = 4,05 \text{ кВт}.$$

Для подальших розрахунків і моделювання доцільно прийняти округлене значення потужності в 4 кВт.

Для реалізації системи необхідно визначити кількість сонячних панелей. Використовуватимуться панелі EcoFlow потужністю 400 Вт кожна. Основні характеристики панелі наведено нижче:

- максимальна потужність панелі: 400 Вт;
- напруга відкритого ланцюга: 37,1 В;
- струм короткого замикання: 13,79 А;
- ККД фотомодуля: 23%.

Розраховуємо кількість панелей:

$$N = \frac{P_{PV}}{P_{mod}} = \frac{4000}{400} = 10$$

Отже, для реалізації системи потужністю 4,0 кВт необхідно встановити 10 фотоелектричних модулів по 400 Вт. Для конфігурації масиву обирається схема 5s2p:

- 5 модулів послідовно;
- 2 паралельні стрінги.

Перевірка напруги:

$$U_{oc} = 5 \cdot 37,1 = 185,5 \text{ В}, \text{ що не перевищує допустиму вхідну напругу MPPT.}$$

Схема приєднання СЕС наводиться на рисунку 2.3.

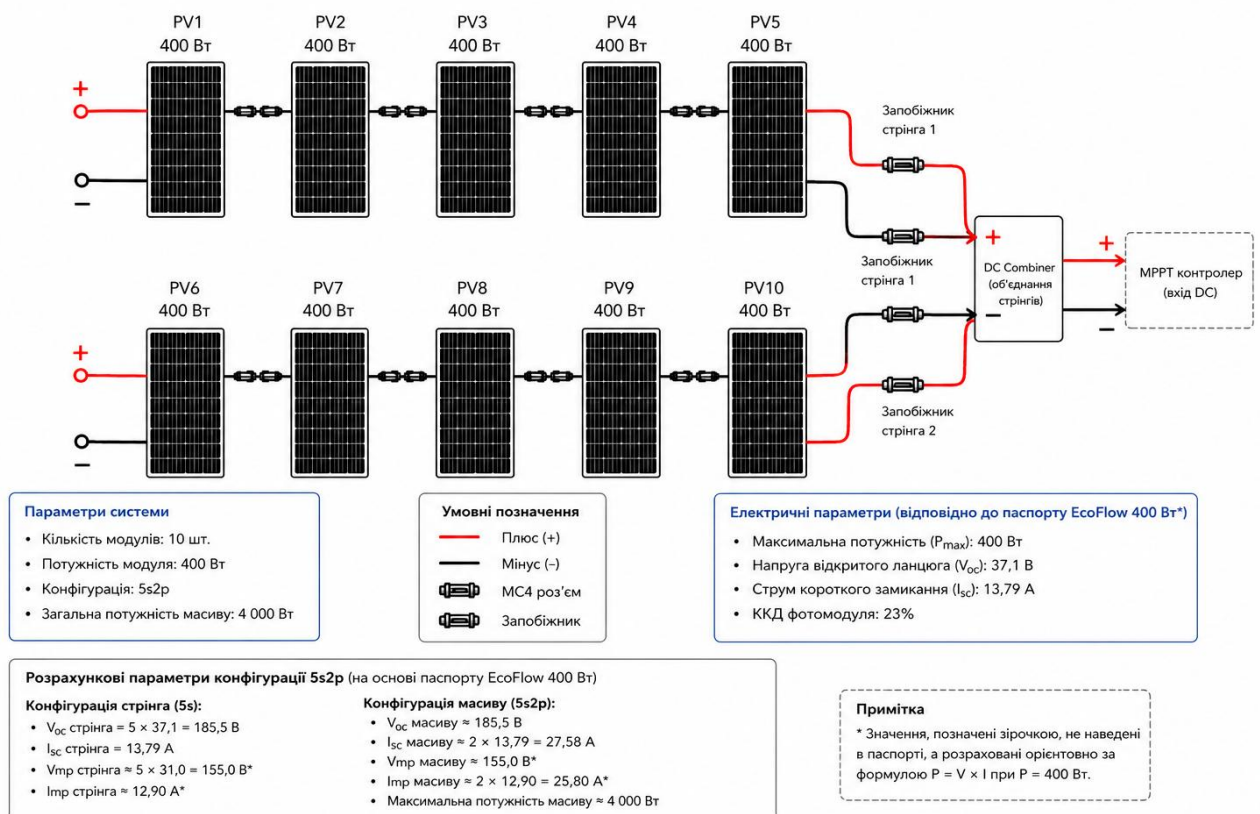


Рисунок 2.3 – Схема приєднання сонячних модулів

2.2.4 Розрахунок ємності акумуляторної батареї

Акумуляторна батарея в автономній фотоелектричній системі виконує функцію накопичення надлишкової електроенергії та забезпечує живлення навантаження в нічний час або при недостатній сонячній генерації. Її ємність повинна бути достатньою для покриття споживання протягом визначеного часу автономної роботи.

Розрахунок необхідної ємності акумуляторної батареї у кВт·год можна виконати за формулою:

$$C_{\text{бат}} = \frac{E \cdot N_{\text{дiб}}}{DOD \cdot \eta},$$

де $C_{\text{бат}}$ – необхідна ємність акумуляторної батареї, кВт·год;

E – добове споживання електроенергії, кВт·год;

$N_{\text{дiб}}$ – кількість діб автономної роботи;

DOD – допустима глибина розряду акумулятора;

η – коефіцієнт корисної дії інвертора.

Для систем на базі літій-залізо-фосфатних акумуляторів доцільно приймати:

$$DOD = 0,8$$

а для сучасних інверторів ККД:

$$\eta = 0,95$$

Для забезпечення 1 доби автономної роботи необхідно:

$$C_{\text{бат}} = \frac{8 \cdot 1}{0,8 \cdot 0,95} = \frac{8}{0,752} = 10,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

З урахуванням технологічного запасу та необхідності зменшення глибини циклів у реальній експлуатації доцільно прийняти акумуляторну батарею ємністю:

$$C_{\text{бат}} = 12 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Це значення забезпечує достатній резерв енергії для автономної роботи будинку. Визначимо ємність акумуляторної батареї в ампер-годинах. Якщо прийняти напругу акумуляторної системи на рівні 48 В:

$$C_{\text{бат.А} \cdot \text{год}} = \frac{C_{\text{бат}} \cdot 1000}{U_{\text{бат}}} = \frac{12 \cdot 1000}{48} = 250 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Отже, еквівалентне струмове навантаження акумуляторної системи має складати 250А. За потрібними характеристиками можна обрати акумулятор Brazzers. Паспортні дані акумулятора наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Паспортні дані акумулятора Brazzers

Характеристики	
Номінальна ємність	250 А×год
Номінальна робоча напруга	48В (51,2В)
Запас потужності	12,8 кВт×год
Вхідні параметри	
Напруга повного заряду	57,6-60В
Діапазон вхідної напруги	30-150В
Вихідні параметри	
Вихідний струм	100А
Напруга вимкнення при розряді	40-46В
Короткочасний пусковий струм	300А (протягом 10 сек)
Діапазон температур зберігання	На малий термін (до 1 місяця) - 20°C до 40°C На тривалий термін (до 1 року) 10°C - 35°C
Рекомендований діапазон температур експлуатації	10°C - 40°C
Саморозряд (при температурі 25С)	менше 3% за місяць
Глибина розряду	понад 80%
Кількість циклів	6000 (при розряді понад 50%)
Габарити	798±2×565±2×401±2mm

2.2.5 Вибір потужності інвертора

Інвертор є ключовим елементом автономної фотоелектричної системи, оскільки він забезпечує перетворення постійного струму від сонячних модулів і акумуляторної батареї у змінний струм для живлення побутових електроприймачів.

Потужність інвертора повинна відповідати:

- максимальному активному навантаженню;
- можливим короткочасним пусковим струмам електроприймачів;
- запасу на одночасне вмикання декількох споживачів.

За результатами аналізу добового графіка навантаження встановлено, що максимальна активна потужність становить:

$$P_{\max} = 1,4 \text{ кВт}$$

Однак у реальних умовах слід враховувати пускові струми холодильника, насосного обладнання та інших електроприймачів. Тому мінімальна потужність інвертора має перевищувати розрахункове пікове навантаження щонайменше у 1,5–2 рази.

Отже, рекомендована потужність інвертора становить:

$$P_{\text{інверт}} \approx 3 \text{ кВт}$$

Перевірка пускового моменту насосного обладнання:

$$P_{\text{пуск.насос}} = 3P_{\text{насос}} = 1,5 \text{ кВт}$$

Пуск холодильника:

$$P_{\text{пуск.холод}} = 3P_{\text{холод}} = 0,45 \text{ кВт}$$

Сумарне короткочасне пускове навантаження:

$$P_{\Sigma \text{пуск}} = P_{\text{пуск.насос}} + P_{\text{пуск.холод}} = 1,95 \text{ кВт}$$

Отже, доцільно використовувати гібридний інвертор з переважувальною здатністю не менше 2 кВт. Пропонується використання інвертора Victron Energy MultiPlus-II 48/3000/35-32 з потужністю 2,4 кВт.

2.2.6 Вибір кабельних ліній, автоматичних вимикачів та елементів захисту

Для забезпечення безпечної та надійної роботи автономної фотоелектричної системи необхідно виконати вибір кабельних ліній, комутаційних апаратів та елементів захисту для сторін постійного та змінного струму. Вибір виконується за робочими струмами елементів системи, допустимими напругами, умовами прокладання та наявністю короткочасних пускових струмів електроприймачів.

Розрахунковий струм одного PV-стрінга приймається за струмом короткого замикання модуля EcoFlow 400 Вт: $I_{sc} = 13,79$ А. Оскільки прийнята конфігурація масиву 5s2p містить два паралельні стрінги, максимальний струм на виході combiner box становить $I_{PV} = 2 \cdot 13,79 = 27,58$ А. Напруга холостого ходу одного стрінга становить $U_{oc} = 5 \cdot 37,1 = 185,5$ В, тому обладнання сторони DC приймається із запасом за напругою не менше 250 В DC.

Для ділянки від PV-модулів до combiner box приймається спеціалізований сонячний кабель PV1-F 1×4 мм², стійкий до ультрафіолетового випромінювання та роботи на постійному струмі. Для ділянки від combiner box до MPPT-контролера, де протікає сумарний струм двох стрінгів, приймається кабель

PV1- F 1×6 мм². Такий переріз має достатній запас за струмовим навантаженням та дозволяє обмежити втрати напруги на DC-ділянці.

На стороні акумуляторної батареї та інвертора розрахунковий струм визначається за потужністю інвертора 2,4 кВт та напругою акумуляторної системи 48 В: $I_{inv} = P/(U \cdot \eta) = 2400/(48 \cdot 0,94) \approx 53$ А. З урахуванням можливих перевантажень інвертора, зарядного струму та короточасних пускових режимів приймається мідний кабель 35 мм² та автоматичний вимикач/запобіжник постійного струму на 125 А. Це узгоджується з паспортним вихідним струмом акумулятора 100 А та короточасним пусковим струмом до 300 А.

На стороні змінного струму інвертор живить однофазну мережу 230 В. Для вихідної лінії інвертора до розподільного щита приймається мідний кабель ВВГнг-LS 3×4 мм² та автоматичний вимикач С16 або С20 залежно від прийнятої схеми розподілу навантажень. Для захисту людей від ураження електричним струмом у розподільчому щиті встановлюється ПЗВ (диференційний автомат типу А із номінальним диференційним струмом 30 мА).

Прийняті кабелі, автоматичні вимикачі та захисні апарати наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Вибір кабельних ліній, автоматичних вимикачів та елементів захисту автономної ФЕС

Ділянка / елемент	Розрахунковий параметр	Прийняте рішення	Призначення
PV-стрінг	$I_{sc} = 13,79$ А; U_{oc} стрінга = 185,5 В	Кабель PV1-F 1×4 мм ² ; запобіжник gPV 15 А на кожен стрінг	Захист та підключення окремих стрінгів
Вихід combiner box – MPPT	$I_{PV} = 27,58$ А	Кабель PV1-F 1×6 мм ² ; DC автомат 2P 40 А, ≥ 250 В DC	Відключення та захист сумарного PV-ланцюга
DC захист PV	$U_{oc} = 185,5$ В	SPD типу 2 для PV, $U_{cpV} \geq 600$ В DC	Захист MPPT та модулів від імпульсних перенапруг
АКБ – інвертор	$I_{inv} \approx 53$ А; $I_{АКБ}$ паспортний до 100 А	Мідний кабель 35 мм ² ; DC запобіжник/автомат 125 А	Захист акумуляторної лінії та інвертора
Інвертор – щит АС	$P_{inv} = 2,4$ кВт; $U = 230$ В	Кабель ВВГнг-LS 3×4 мм ² ; автомат С16/С20	Живлення розподільного щита навантажень

Захист АС	Однофазна мережа 230 В	SPD типу 2, ПЗВ/дифавтомат типу А, 30 мА	Захист від перенапруг та ураження струмом
Заземлення та вирівнювання потенціалів	Металеві рами, корпуси обладнання	РЕ-провідник не менше 6 мм ² Cu; приєднання до ГЗШ	Електробезпека та зниження ризику пробою ізоляції

2.2.7 Блискавкозахист та захист від імпульсних перенапруг

Для автономної фотоелектричної системи, особливо у разі розміщення фотоелектричних модулів на даху будинку, необхідно передбачити комплекс заходів блискавкозахисту та захисту від імпульсних перенапруг. Такі заходи спрямовані на зменшення ризику пошкодження сонячних модулів, МРРТ-контролера, інвертора, акумуляторної батареї та внутрішньої електропроводки під час прямих або непрямих дій блискавки [14].

У складі системи приймається зовнішній блискавкозахист будівлі, що включає блискавкоприймач, доземні провідники та заземлювальний пристрій. Фотоелектричні модулі та металеві монтажні конструкції мають бути приєднані до системи вирівнювання потенціалів. Прокладання DC-кабелів від PV-масиву до контролера заряду виконується із мінімізацією петель, у захисних каналах або трубах, з механічним захистом та дотриманням полярності ліній.

На стороні постійного струму передбачається встановлення пристроїв захисту від імпульсних перенапруг типу 2 для PV-ланцюгів, а за наявності зовнішньої системи блискавкозахисту або підвищеного ризику прямого удару блискавки – застосування SPD типу 1+2. На стороні змінного струму SPD встановлюється у розподільчому щиті перед груповими лініями навантаження. Захисні апарати повинні бути узгоджені за робочою напругою, струмом короткого замикання та рівнем захисту із параметрами інвертора та електроустановки [16].

Заземлювальний провідник, металеві рами PV-модулів, корпуси інвертора, контролера заряду, акумуляторної шафи та розподільчого щита приєднуються до головної заземлювальної шини. Такий підхід забезпечує вирівнювання потенціалів, зменшує ймовірність пробою ізоляції та підвищує електробезпеку експлуатації автономної фотоелектричної системи.

2.2.7 Техніко-економічна оцінка системи

Після здійснення оціночних розрахунків слід розрахувати економічну ефективність системи. Орієнтовна вартість системи наводиться в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Орієнтовна вартість обладнання автономної фотоелектричної системи

Елемент	Кількість	Ціна за од., грн	Вартість, грн
Інвертор Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32	1	29848	29848
Сонячна панель EcoFlow 400 Вт	10	9999	99990
АКБ LiFePO4 48 В 250 А·год	1	118000	118000
MPPT Victron SmartSolar 250/60	1	27544	27544
PV-кабель, AC/DC кабелі та MC4-з'єднувачі	1 компл.	10500	10500
DC автоматичні вимикачі, запобіжники gPV, тримачі	1 компл.	4800	4800
AC автоматичний вимикач, ПЗВ/дифавтомат	1 компл.	2900	2900
SPD типу 2 для DC та AC сторін	1 компл.	6500	6500
Combiner box, кріплення, заземлення та монтажні матеріали	1 компл.	8346	8346
Разом			308428

На основі прорахованого кошторису можна дослідити орієнтовну окупність системи (табл. 2.5).

Простий термін окупності автономної фотоелектричної системи за чинного тарифу 4,32 грн/кВт·год становить 12,23 року. Розрахунок виконано для сумарних капітальних витрат CAPEX 308428 грн та річного виробітку 5840 кВт·год, що забезпечує річну економію 25228,8 грн/рік.

Для реалістичного сценарію з урахуванням коефіцієнта корисного використання виробленої енергії 0,8 корисний виробіток становить 4672 кВт·год, реальна економія –20183,04 грн/рік, а строк окупності – 15,28 року.

Таблиця 2.5 – Окупність системи

Параметр	Значення	Одиниці
CAPEX	308428	грн
Річний виробіток	5840	кВт·год
Тариф	4,32	грн/кВт·год
Річна економія	25228,8	грн/рік
Проста окупність, базова	12,23	років
Коеф. корисного використання	0,8	-
Корисний виробіток	4672	кВт·год
Реальна економія	20183,04	грн/рік
Реалістична окупність	15,28	років
Сценарний тариф	6	грн/кВт·год
Економія при 6 грн	35040	грн/рік
Окупність при 6 грн	8,802	років
Параметр	Значення	Одиниці

За сценарного тарифу 6 грн/кВт·год річна економія становить 35040 грн/рік, а строк окупності скорочується до 8,802 року.

Висновки по розділу 2

Визначено вихідні параметри навантаження об'єкта, для якого середньодобове споживання електроенергії становить 8 кВт·год, а максимальне активне навантаження – 1,4 кВт. На основі аналізу структури споживання виконано поділ навантажень на критичні та некритичні, що дозволило сформулювати вимоги до автономності системи та резервування електроживлення.

Розроблено структуру автономної фотоелектричної системи, що включає фотоелектричний масив, MPPT-контролер заряду, акумуляторну батарею, інвертор, кабельні лінії, автоматичні вимикачі та систему захисту. Показано, що така структура забезпечує послідовне перетворення, накопичення та розподіл електричної енергії між споживачами будинку.

За результатами розрахунків визначено необхідну встановлену потужність фотоелектричної системи на рівні 4 кВт, для реалізації якої прийнято 10 фотоелектричних модулів потужністю 400 Вт кожен, з'єднаних за схемою 5s2p. Виконано перевірку конфігурації масиву за параметрами напруги та струму, що підтвердило її сумісність із обраним MPPT-контролером.

Розраховано необхідну ємність системи накопичення, за результатами чого прийнято акумуляторну батарею LiFePO₄ напругою 48 В та ємністю 250 А·год

(12 кВт·год), що забезпечує добовий резерв автономної роботи. Показано, що використання літій-залізо-фосфатної технології є доцільним з точки зору ресурсу, ефективності та надійності.

Обґрунтовано вибір інвертора Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32 номінальною потужністю 2,4 кВт з урахуванням максимального активного навантаження та короткочасних пускових режимів електроприймачів. Встановлено, що обраний інвертор забезпечує необхідний запас потужності та відповідає вимогам роботи автономної системи.

Виконано техніко-економічну оцінку розробленої системи, за результатами якої орієнтовна вартість реалізації становить 308,4 тис. грн. Визначено, що простий термін окупності системи за чинного тарифу складає близько 12 років, а з урахуванням реальних умов експлуатації – близько 15 років. Окремо враховано кабелі, автоматичні вимикачі та елементи захисту вартістю близько 33,0 тис. грн, що становить 10,7 % загальної вартості. Встановлено, що ці витрати збільшують простий термін окупності приблизно на 1,31 року, а реалістичний строк окупності – на 1,64 року.

Таким чином, у розділі розроблено структуру автономної фотоелектричної системи електропостачання, обґрунтовано вибір її основного обладнання та визначено ключові технічні й економічні параметри. Отримані результати є вихідними даними для подальшого моделювання режимів роботи системи та аналізу її функціонування у розділі 3.

3 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ

3.1 Постановка задачі моделювання

У попередньому розділі було розроблено автономну фотоелектричну систему електропостачання приватного житлового будинку та визначено її основні параметри. Для подальшого аналізу прийнято фотоелектричний масив встановленою потужністю 4 кВт, акумуляторну батарею LiFePO₄ напругою 48 В та ємністю 250 А·год, а також інверторну систему, здатну забезпечувати живлення побутових електроприймачів змінного струму. Добове споживання електроенергії будинку прийнято на рівні 8 кВт·год. Функціональну схему АФЕС наведено на рисунку 3.1.

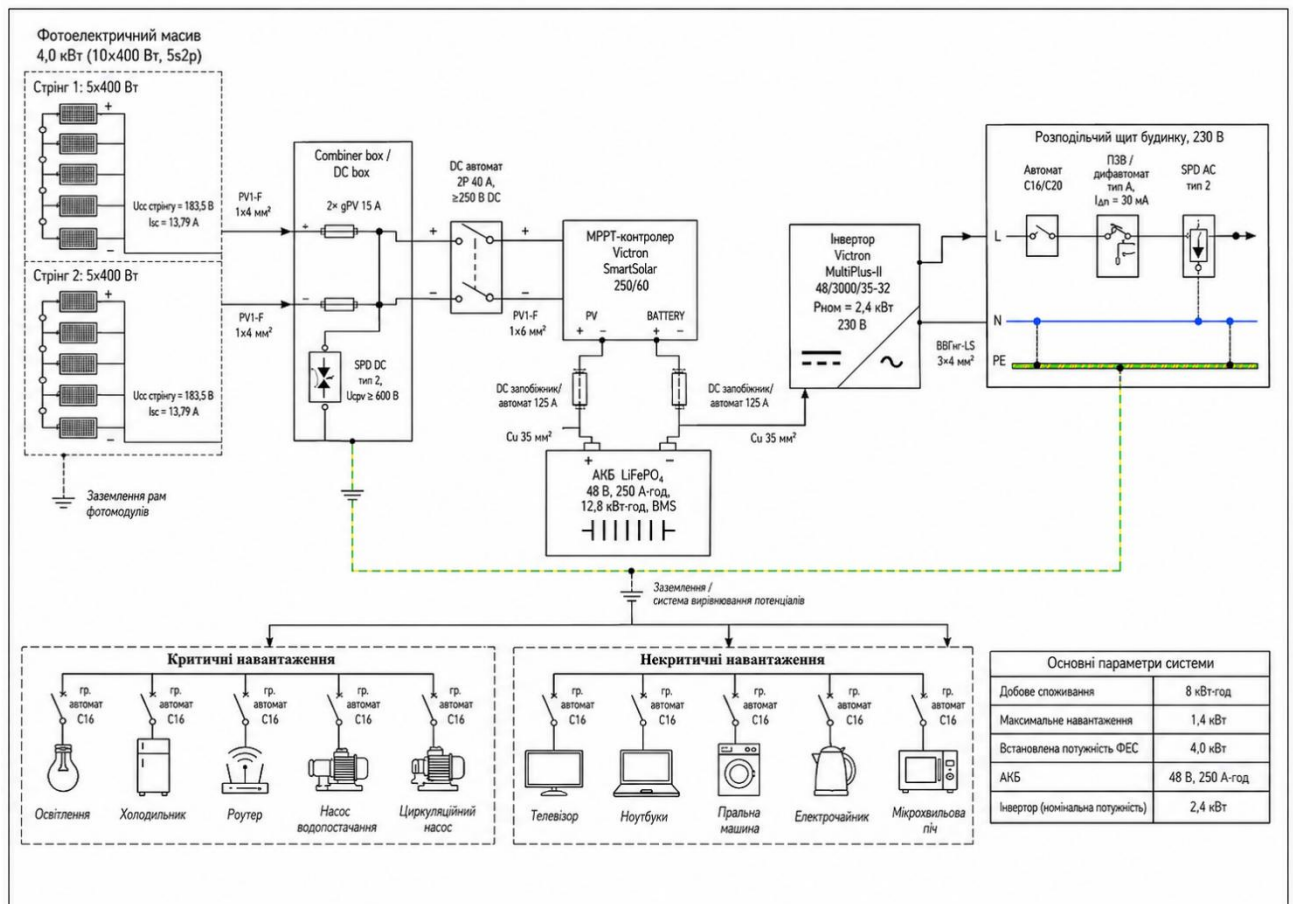


Рисунок 3.1 – Функціональна схема автономної ФЕС

Метою розділу є перевірка працездатності запропонованої автономної фотоелектричної системи в характерних експлуатаційних режимах. На відміну від статичного розрахунку потужності обладнання, моделювання дозволяє оцінити зміну енергетичного балансу впродовж доби, визначити стан заряду акумуляторної батареї та виявити можливі періоди дефіциту електроенергії.

У межах розділу розглянуто три основні сценарії роботи системи: літній сонячний день, зимовий розрахунковий день та похмурий зимовий день. Додатково виконано оцінку роботи системи в умовах графіків погодинних відключень, що є актуальним для приватних будинків в умовах нестабільного зовнішнього електропостачання:

- побудувати добовий графік електричного навантаження приватного будинку;
- сформувати розрахункові профілі генерації фотоелектричного масиву для різних сезонних умов;
- розробити спрощену математичну модель енергетичного балансу системи;
- визначити зміну стану заряду акумуляторної батареї протягом доби;
- оцінити дефіцит або надлишок електроенергії в кожному сценарії;
- сформувати рекомендації щодо підвищення ефективності та автономності системи.

Для виконання моделювання застосовано погодинний розрахунковий алгоритм енергетичного балансу, який може бути реалізований у вигляді програмного лістингу або блокової моделі у розрахунковому середовищі. У моделі окремими блоками задано вихідні параметри системи, добовий профіль навантаження, профілі сонячної генерації, блок розрахунку енергетичного балансу акумуляторної батареї, обмеження за мінімальним і максимальним SOC та блок формування результатів. Структурну схему алгоритму, за яким виконувалось моделювання режимів роботи автономної ФЕС, наведено на рисунку 3.2.

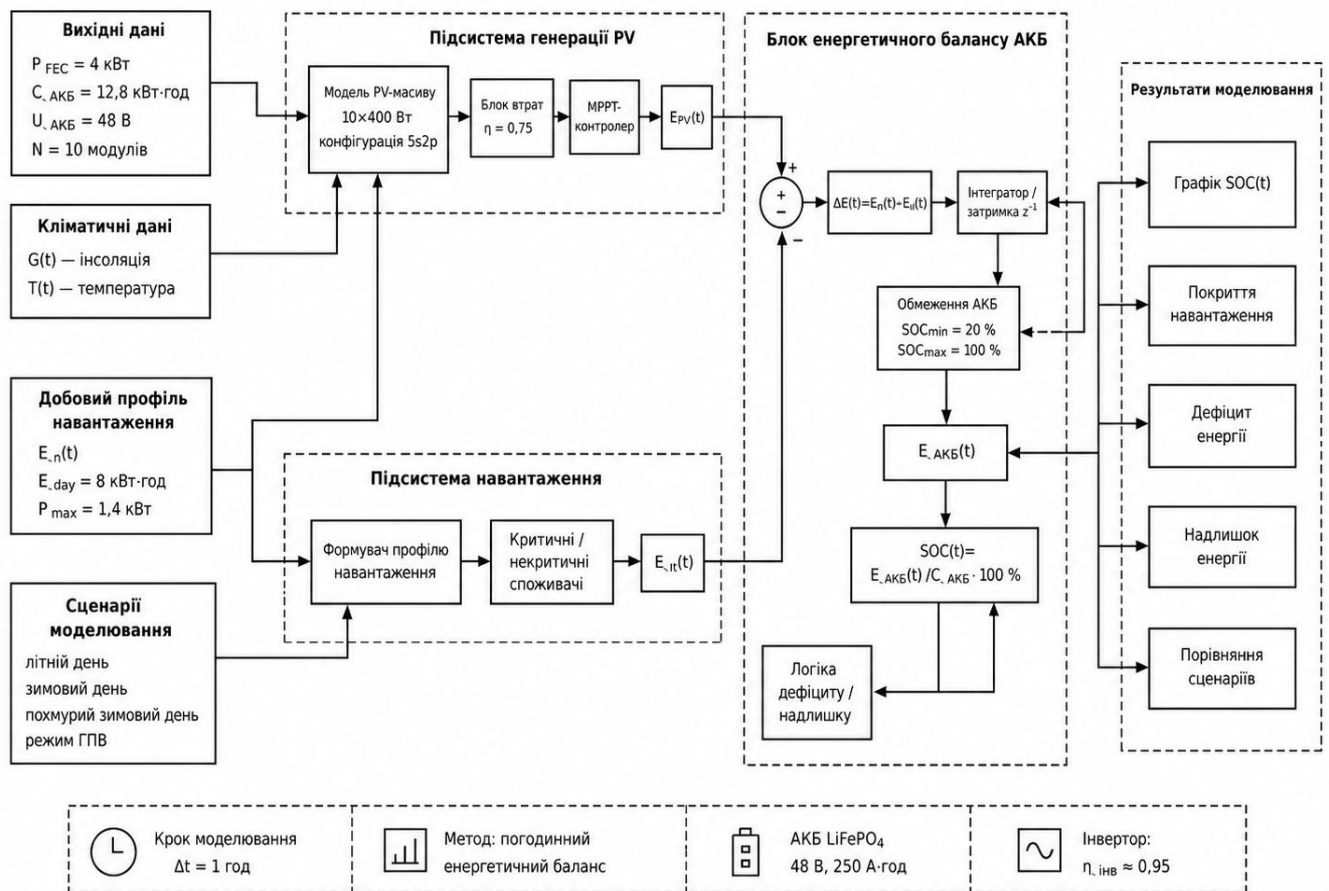


Рисунок 3.2 – Структурна схема алгоритму моделювання режимів роботи автономної ФЕС

3.2 Вихідні дані для моделювання

Для моделювання використано параметри системи, розраховані у розділі 2. Основні вихідні дані наведено в таблиці 3.1. Вони характеризують як технічну частину автономної фотоелектричної системи, так і прийнятий рівень електричного навантаження будинку.

Для оцінки можливості резервування навантаження споживачі будинку поділено на критичні та некритичні. До критичних віднесено освітлення, холодильник, роутер, насос водопостачання та циркуляційний насос. Їх добове споживання становить приблизно 3,74 кВт·год. До некритичних належать споживачі, роботу яких можна перенести або тимчасово обмежити: пральна машина, електрочайник, мікрохвильова піч, частина побутової техніки.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для моделювання автономної фотоелектричної системи

Параметр	Прийняте значення	Пояснення
Встановлена потужність ФЕС	4,0 кВт	10 модулів по 400 Вт
Конфігурація PV-масиву	5s2p	2 паралельні стрінги по 5 модулів
Ємність акумуляторної батареї	12,8 кВт·год	LiFePO ₄ , 48 В, 250 А·год
Корисна ємність АКБ	10,24 кВт·год	при допустимій глибині розряду 80 %
ККД інвертора	0,94	враховує втрати перетворення DC/AC
ККД заряджання АКБ	0,95	враховує втрати процесу накопичення
Добове споживання будинку	8,0 кВт·год/добу	за графіком навантаження
Початковий стан заряду АКБ	80 %	умовний початковий рівень для добового циклу

3.3 Математична модель енергетичного балансу системи

Моделювання автономної фотоелектричної системи виконано методом погодинного енергетичного балансу. Розрахунковим кроком прийнято одну годину. Для кожного моменту часу визначається співвідношення між енергією, виробленою фотоелектричним масивом, енергією навантаження та енергією, доступною в акумуляторній батареї.

Енергетичний баланс системи можна представити у вигляді:

$$E_{AKB}(t) = E_{AKB}(t-1) + E_{PV}(t) \cdot \eta_{зар} - \frac{E_H(t)}{\eta_{инв}} \quad (3.1)$$

де $E_{AKB}(t)$ – запас енергії в акумуляторній батареї на поточному часовому кроці, кВт·год;

$E_{AKB}(t-1)$ – запас енергії на попередньому кроці, кВт·год;

$E_{PV}(t)$ – енергія, вироблена фотоелектричними модулями за годину, кВт·год;

$E_H(t)$ – електроенергія, спожита навантаженням за годину, кВт·год;

$\eta_{\text{зар}}$ – коефіцієнт корисної дії процесу заряджання акумулятора;

$\eta_{\text{інв}}$ – коефіцієнт корисної дії інвертора.

У реальній системі запас енергії акумуляторної батареї обмежується мінімальним та максимальним допустимими значеннями:

$$E_{AKB_min}(t) \leq E_{AKB}(t) \leq E_{AKB_max}(t) \quad (3.2)$$

Для прийнятої акумуляторної батареї номінальною ємністю 12,8 кВт·год максимальний запас енергії становить 12,8 кВт·год. З урахуванням допустимої глибини розряду 80 % мінімальний залишковий запас енергії дорівнює:

$$E_{AKB_min} = 12,8 \cdot (1 - 0,8) = 2,56 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Корисна енергія, яку можна використати без перевищення допустимої глибини розряду, становить:

$$E_{AKB_кор} = 12,8 \cdot 0,8 = 10,24 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Стан заряду акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$SOC(t) = \frac{E_{AKB}(t)}{E_{AKB_max}} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Якщо в певний момент часу генерація фотоелектричного масиву перевищує поточне навантаження, надлишкова енергія спрямовується на заряджання акумуляторної батареї. Якщо акумулятор повністю заряджений, надлишок енергії вважається обмеженим. Якщо генерації недостатньо, дефіцит покривається акумулятором. У разі досягнення мінімально допустимого SOC виникає непокритий дефіцит енергії.

3.4 Формування добових профілів навантаження та сонячної генерації

Добовий графік навантаження сформовано на основі прийнятого переліку побутових електроприймачів. Навантаження має нерівномірний характер: у нічний період споживання зменшується до базового рівня, а в ранкові та вечірні години формуються локальні максимуми. Розрахунковий добовий профіль навантаження наведено на рисунку 2.1.

Профіль сонячної генерації залежить від сезону, тривалості світлового дня, хмарності та температурних умов. Для дослідження прийнято три характерні профілі генерації: літній сонячний день, зимовий розрахунковий день та похмурий зимовий день. Прийняті добові значення генерації наведено в таблиці 3.2, а відповідні графічні профілі – на рисунку 3.3.

Таблиця 3.2 – Прийняті добові профілі генерації фотоелектричної системи

Сценарій	Добова генерація, кВт·год	Характеристика умов
Літній сонячний день	18,5	тривалий світловий день, високий рівень інсоляції
Зимовий розрахунковий день	5,2	зменшена тривалість дня та нижчий рівень сонячної радіації
Похмурий зимовий день	1,8	несприятливі погодні умови та низький виробіток

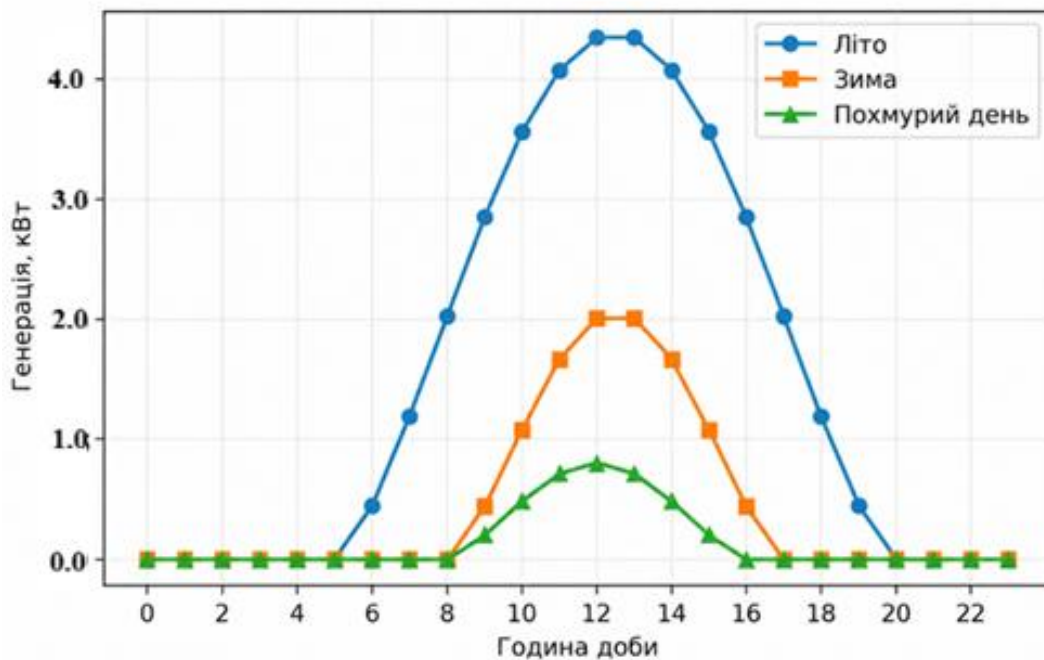


Рисунок 3.3 – Розрахункові профілі генерації фотоелектричного масиву потужністю 4 кВт

Як видно з рисунка 3.2, у літній період максимум генерації припадає на денні години, тоді як основне навантаження приватного будинку зміщується на ранок і вечір. Це підтверджує необхідність використання акумуляторної батареї, яка забезпечує перенесення надлишкової денної генерації на вечірній та нічний періоди.

3.5 Моделювання роботи системи у літній період

У літньому сценарії добова генерація фотоелектричного масиву становить 18,5 кВт·год, що суттєво перевищує добове споживання будинку. Такий режим є найбільш сприятливим для автономної системи, оскільки протягом дня фотоелектричний масив одночасно покриває поточне навантаження та заряджає акумуляторну батарею. Результати моделювання цього режиму наведено на рисунку 3.4.

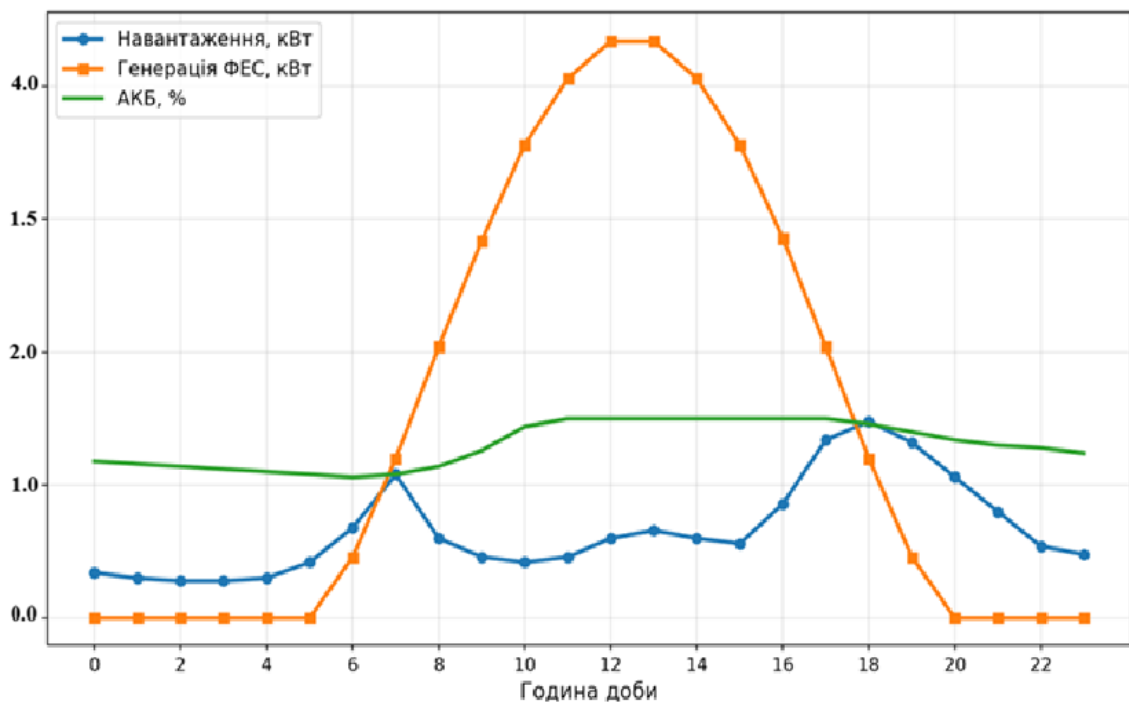


Рисунок 3.4 – Моделювання роботи автономної ФЕС у літній сонячний день

За результатами моделювання дефіцит електроенергії в літньому сценарії відсутній. У денні години виникає надлишок генерації, який після заряджання акумулятора може бути обмежений або використаний для додаткових некритичних навантажень. Це свідчить про достатність встановленої потужності фотоелектричного масиву для літнього режиму роботи.

Практично це означає, що влітку систему доцільно експлуатувати з перенесенням енергоємних процесів на денні години. Наприклад, роботу пральної машини, заряджання портативних пристроїв або використання допоміжного обладнання доцільно планувати в період максимальної генерації. Такий підхід дозволяє підвищити коефіцієнт власного споживання та зменшити обмеження надлишкової енергії.

3.6 Моделювання роботи системи у зимовий період

Зимовий режим є більш складним для автономної фотоелектричної системи, оскільки зменшується тривалість світлового дня та знижується рівень сонячної радіації. Для розрахункового зимового дня прийнято добову генерацію 5,2 кВт·год. Результати моделювання зимового розрахункового режиму наведено на рисунку 3.5.

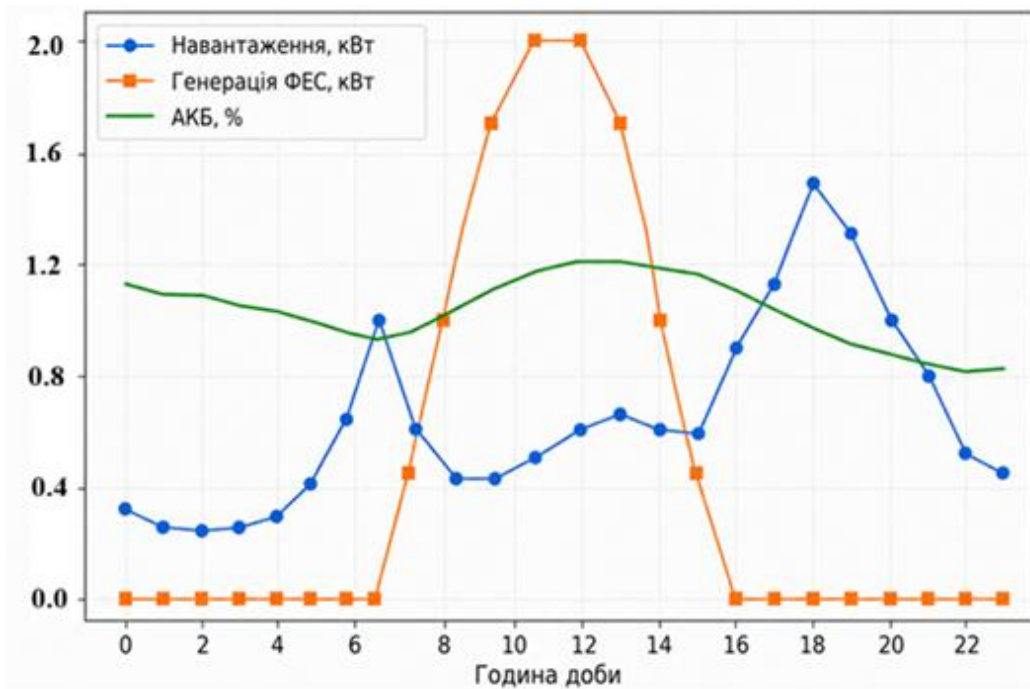


Рисунок 3.5 – Моделювання роботи автономної ФЕС у зимовий розрахунковий день

У зимовому розрахунковому сценарії фотоелектрична генерація частково покриває поточне навантаження та зменшує швидкість розряду акумуляторної батареї. Однак повного відновлення заряду протягом дня не відбувається. Це

означає, що при кількох послідовних зимових днях із низькою генерацією система може перейти до режиму енергетичного дефіциту.

Отже, для зимового періоду необхідно передбачати енергоменеджмент: пріоритетне живлення критичних навантажень, обмеження роботи потужних побутових приладів у вечірній час, а також можливість збільшення встановленої потужності фотоелектричного масиву або використання резервного джерела живлення.

3.7 Моделювання роботи системи у похмурий зимовий день

Похмурий зимовий день є несприятливим сценарієм, який дозволяє оцінити запас автономності системи. У цьому режимі прийнята добова генерація становить лише 1,8 кВт·год, тому основна частина навантаження покривається за рахунок акумуляторної батареї. Результати моделювання цього сценарію наведено на рисунку 3.6.

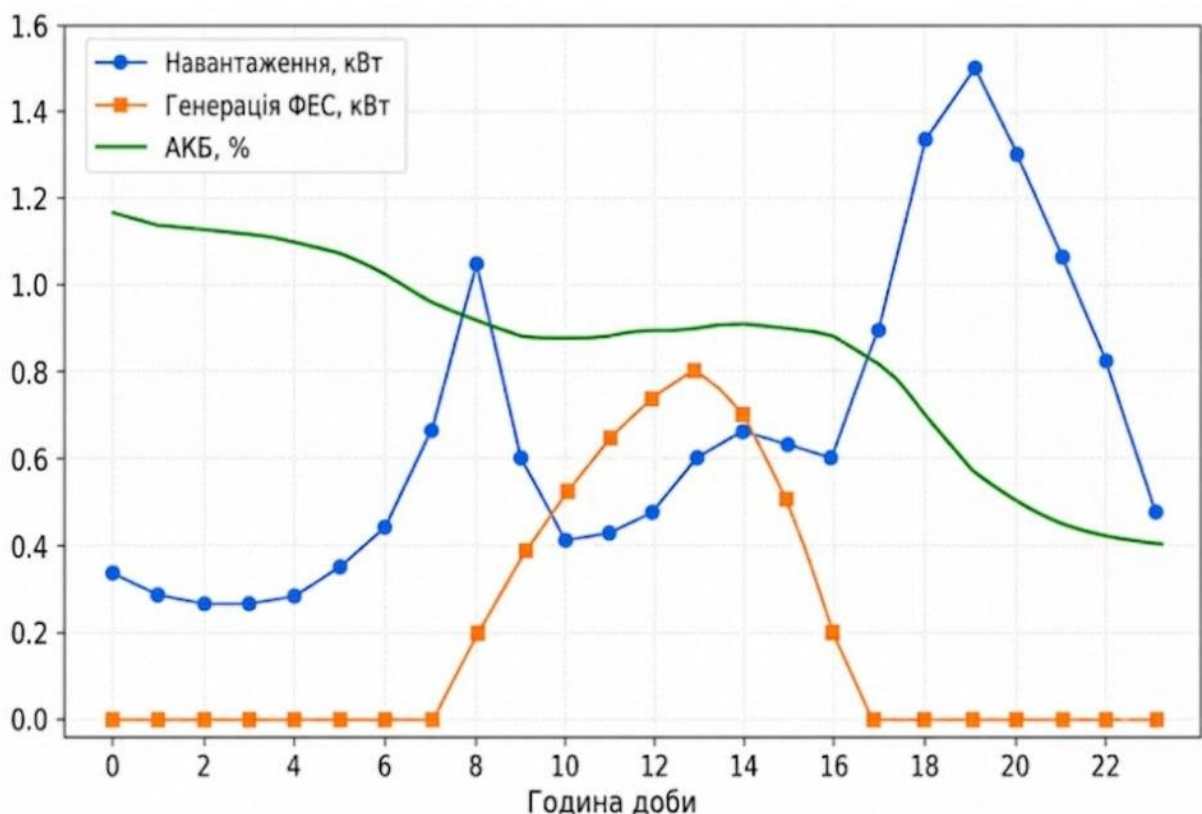


Рисунок 3.6 – Моделювання роботи автономної ФЕС у похмурий зимовий день

Результати моделювання показують, що в похмурий зимовий день акумуляторна батарея інтенсивно розряджається. Якщо початковий стан заряду становить 80 %, система здатна забезпечувати живлення протягом значної

частини доби, однак запас енергії суттєво зменшується. При повторенні такого сценарію протягом декількох днів без додаткового заряджання можливе досягнення мінімального допустимого SOC.

У таких умовах доцільно переходити на режим живлення тільки критичних споживачів. Це дозволяє суттєво збільшити тривалість автономної роботи, оскільки добове споживання критичних навантажень становить близько 3,74 кВт·год замість 8,0 кВт·год для повного навантаження будинку.

3.8 Аналіз зміни стану заряду акумуляторної батареї

Одним із ключових показників роботи автономної фотоелектричної системи є стан заряду акумуляторної батареї. Саме SOC визначає здатність системи забезпечувати живлення споживачів у періоди відсутності сонячної генерації. На рисунку 3.7 наведено зміну SOC для трьох досліджених сценаріїв.

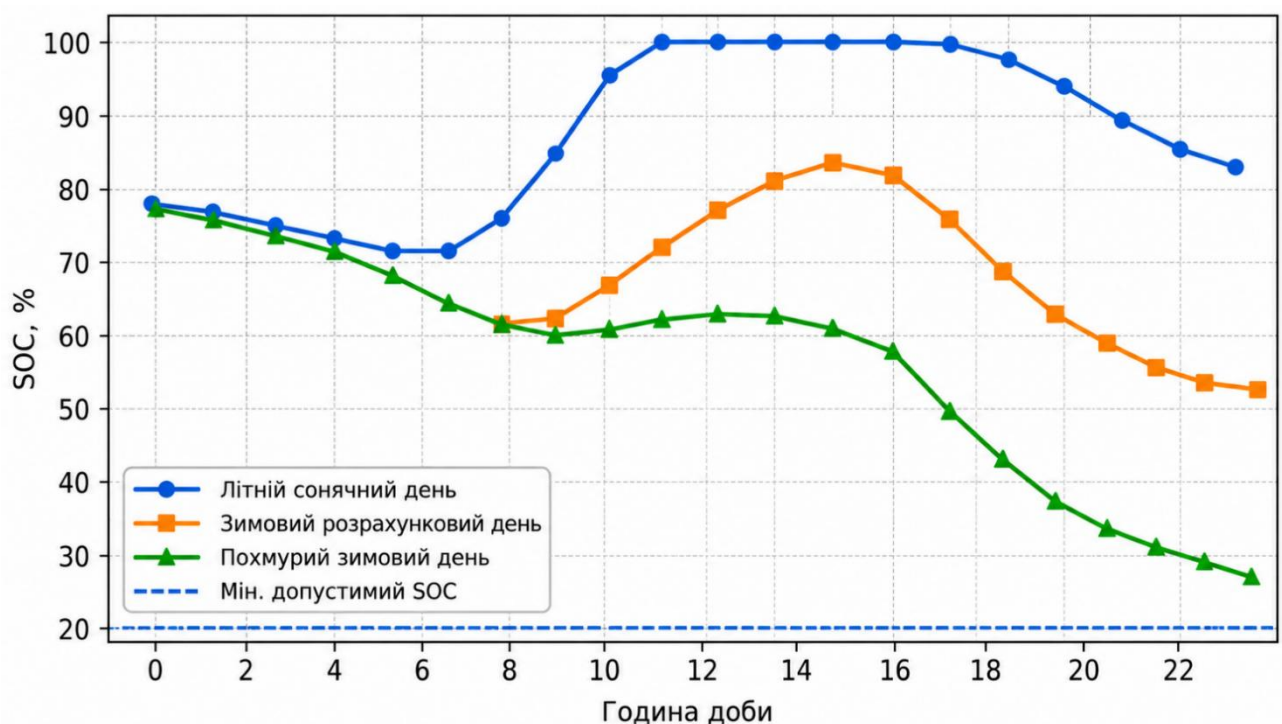


Рисунок 3.7 – Зміна стану заряду акумуляторної батареї у різних режимах роботи

У літньому сценарії акумуляторна батарея після ранкового часткового розряду заряджається до верхньої межі, що створює достатній резерв для вечірнього та нічного навантаження. У зимовому розрахунковому сценарії SOC поступово зменшується, оскільки добова генерація нижча за добове споживання.

У похмурому зимовому сценарії розряд акумулятора є найбільш інтенсивним, що підтверджує необхідність обмеження некритичних споживачів.

3.9 Порівняльний аналіз результатів моделювання

Порівняльні результати моделювання наведено в таблиці 3.3. Вони дозволяють оцінити, наскільки обрана конфігурація системи відповідає різним умовам експлуатації.

Таблиця 3.3 – Порівняльні результати моделювання режимів роботи автономної ФЕС

Сценарій	Споживання , кВт·год	Генерація PV, кВт·год	Покрито системою , кВт·год	Дефіцит, кВт·год	Обмеження/ надлишок, кВт·год	SOC наприкінці, %	Мін. SOC, %
Літній сонячний день	8,0	18,5	8,0	0,0	9,43	82,9	70,9
Зимовий розрахунк овий день	8,0	5,2	8,0	0,0	0,0	53,0	53,0
Похмурий зимовий день	8,0	1,8	8,0	0,0	0,0	27,5	27,5

З таблиці 3.3 видно, що в літній період система має значний запас генерації. У зимовий розрахунковий день система здатна покривати навантаження за рахунок комбінації сонячної генерації та акумуляторної батареї, однак наприкінці доби запас енергії зменшується. У похмурий зимовий день система працює переважно від акумулятора, тому її автономність обмежується початковим станом заряду та фактичним рівнем споживання.

Коефіцієнт автономності системи можна визначити як відношення енергії, покритої автономною системою, до загального споживання:

$$K_{авт} = \frac{E_{покp}}{E_{спож}} \quad (3.4)$$

Для літнього сценарію Кавт дорівнює 1,0, тобто навантаження повністю покривається системою. Для зимового розрахункового та похмурого сценаріїв значення коефіцієнта залежить від початкового стану заряду батареї та кількості послідовних днів із низькою генерацією. Тому при практичному застосуванні системи доцільно контролювати SOC та вводити автоматичні режими обмеження навантаження.

3.10 Дослідження роботи системи в умовах графіків погодинних відключень

В умовах графіків погодинних відключень автономна фотоелектрична система може виконувати функцію джерела резервного живлення. Для оцінки такої можливості розглянуто декілька тривалостей відсутності зовнішнього живлення: 4, 8, 12 та 24 години. Розрахунок виконано окремо для повного навантаження будинку та для критичних споживачів.

Корисна енергія акумуляторної батареї з урахуванням допустимої глибини розряду та ККД інвертора становить:

$$E_{AKB_кор} = 12,8 \cdot 0,8 \cdot 0,94 = 9,63 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Результати оцінки наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Оцінка роботи системи при графіках погодинних відключень

Тривалість відключення, год	Енергія для всіх навантажень, кВт·год	Покриття всіх навантажень	Енергія для критичних навантажень, кВт·год	Покриття критичних навантажень
4	1,33	так	0,62	так
8	2,67	так	1,25	так
12	4,0	так	1,87	так
24	8,0	так	3,74	так

Результати показують, що при повністю зарядженій акумуляторній батареї система здатна забезпечити роботу всіх прийнятих навантажень протягом доби

за умови середнього рівня споживання. Однак у реальних умовах одночасне використання потужних електроприймачів може різко збільшити навантаження та скоротити час автономної роботи. Тому для режиму ГПВ доцільніше орієнтуватися на живлення критичних споживачів, для яких запас автономності є значно більшим.

У разі живлення лише критичних навантажень система має суттєвий резерв. Навіть за відсутності сонячної генерації акумуляторна батарея здатна забезпечити роботу освітлення, холодильника, роутера та насосного обладнання протягом тривалого часу. Це підтверджує доцільність поділу електричних ліній будинку на критичні та некритичні.

Висновки до розділу 3

У розділі виконано погодинне моделювання режимів роботи автономної фотоелектричної системи електропостачання приватного будинку, параметри якої були визначені у попередньому розділі. Для дослідження прийнято систему з фотоелектричним масивом 4 кВт, акумуляторною батареєю LiFePO_4 48 В ємністю 250 А·год та добовим навантаженням 8 кВт·год. Такий підхід дав змогу оцінити не лише сумарний енергетичний баланс, а й зміну стану заряду акумулятора протягом доби.

Розроблено математичну модель погодинного енергетичного балансу, яка враховує генерацію фотоелектричної системи, споживання навантаження, втрати в інверторі, втрати заряджання акумуляторної батареї та допустимі межі її розряду. Визначено, що корисний запас енергії акумуляторної батареї з урахуванням допустимої глибини розряду становить 10,24 кВт·год, а з урахуванням ККД інвертора для живлення навантаження доступно близько 9,63 кВт·год.

За результатами моделювання літнього сонячного дня встановлено, що система повністю покриває добове навантаження будинку та має надлишок генерації. Це свідчить про достатність встановленої потужності фотоелектричного масиву для сприятливих сезонних умов. У такому режимі

доцільно максимально переносити роботу потужних некритичних споживачів на денний період.

Моделювання зимового розрахункового дня показало, що генерація фотоелектричного масиву є нижчою за добове споживання. Система здатна забезпечувати живлення навантаження за рахунок акумуляторної батареї, однак її стан заряду поступово зменшується. Це означає, що при тривалих періодах низької сонячної генерації необхідно застосовувати обмеження некритичних навантажень або передбачати резервне джерело заряджання.

У похмурому зимовому сценарії система працює переважно від акумуляторної батареї. Такий режим є найбільш критичним і визначає реальну автономність об'єкта. Встановлено, що для підвищення тривалості роботи системи в несприятливих умовах необхідно переходити на живлення лише критичних споживачів, добове споживання яких становить приблизно 3,74 кВт·год.

Оцінка режимів графіків погодинних відключень показала, що система має достатній запас для резервного живлення критичних навантажень протягом тривалого часу. При цьому робота всіх побутових електроприймачів можлива лише за умови контролю потужності та раціонального використання енергії.

Таким чином, розроблена автономна фотоелектрична система є технічно працездатною та доцільною для забезпечення енергетичної незалежності приватного будинку. Найбільш ефективним режимом її експлуатації є поєднання автоматичного керування навантаженнями, пріоритетного живлення критичних споживачів, контролю стану заряду акумуляторної батареї та використання денного періоду для роботи потужних побутових приладів.

ВИСНОВКИ

В цій роботі було розглянуто питання розробки та моделювання автономної фотоелектричної системи електропостачання приватного житлового будинку.

У першому розділі виконано аналітичний огляд автономних фотоелектричних систем електропостачання та визначено їх основні складові: фотоелектричний масив, систему накопичення енергії, інверторне обладнання, засоби керування, моніторингу й захисту. Обґрунтовано, що для приватного будинку така система є технічним рішенням, яке дозволяє підвищити надійність електроживлення, зменшити залежність від централізованої мережі та забезпечити резервування критично важливих споживачів у періоди відключень.

У процесі аналізу підходів до проєктування автономних фотоелектричних систем визначено, що використання лише усереднених значень сонячної радіації та навантаження не дає повного уявлення про реальну роботу системи. Тому для обґрунтованого вибору обладнання доцільно застосовувати погодинний або сценарний підхід, який враховує зміну генерації, нерівномірність споживання, добові коливання навантаження та сезонні умови експлуатації.

У другому розділі визначено структуру електричного навантаження для приватного житлового будинку. Добове споживання прийнято на рівні 8 кВт·год, а максимальна активна потужність навантаження – 1,4 кВт. Для підвищення надійності електропостачання споживачі поділено на критичні та некритичні, що дало змогу обґрунтувати пріоритети живлення в автономному режимі.

На основі розрахунку енергетичного балансу було визначено необхідну потужність фотоелектричної установки. З урахуванням добового споживання, втрат у системі та необхідного резерву прийнято фотоелектричний масив встановленою потужністю 4 кВт. Для його реалізації обрано 10 сонячних модулів потужністю 400 Вт кожен із конфігурацією з'єднання 5s2p. Така схема забезпечує необхідну потужність генерації та відповідає вимогам щодо сумісності з контролером заряду.

Для забезпечення автономної роботи системи було виконано розрахунок акумуляторної батареї. За результатами розрахунку прийнято літій-залізо-

фосфатний накопичувач напругою 48 В та ємністю 250 А·год, що відповідає запасу енергії близько 12 кВт·год. З урахуванням допустимої глибини розряду така батарея забезпечує достатній резерв для живлення споживачів у періоди відсутності сонячної генерації або під час аварійного режиму роботи.

Також було обґрунтовано вибір інверторного обладнання. З урахуванням максимального навантаження, можливих пускових струмів побутової техніки та насосного обладнання прийнято інвертор Victron MultiPlus-II 48/3000/35-32.

Його параметри дозволяють забезпечити живлення основних електроприймачів будинку та підтримувати стабільну роботу автономної системи в розрахункових режимах.

У роботі виконано орієнтовну техніко-економічну оцінку запропонованої системи. Встановлено, що сумарна вартість обладнання становить близько 308,4 тис. грн. За чинного тарифу на електроенергію простий строк окупності системи може складати приблизно 12 років, а з урахуванням реальних втрат і неповного використання виробленої електроенергії – близько 15 років. При зростанні тарифів або частішому використанні системи як резервного джерела електропостачання економічна доцільність її впровадження підвищується.

У третьому розділі було виконано моделювання режимів роботи автономної фотоелектричної системи. Основну увагу приділено аналізу енергетичного балансу, зміні стану заряду акумуляторної батареї та здатності системи покривати навантаження у різних умовах сонячної генерації. Розглянуто характерні сценарії роботи, зокрема літній сонячний день, зимовий період, похмурі умови та режими, наближені до графіків погодинних відключень.

За результатами моделювання встановлено, що в умовах достатньої сонячної генерації система здатна повністю покривати добове навантаження будинку, заряджати акумуляторну батарею та забезпечувати живлення споживачів у вечірній і нічний періоди. У таких режимах автономна фотоелектрична система працює з достатнім запасом енергії та може забезпечити високий рівень незалежності від зовнішнього електропостачання.

У зимовий період та за умов зниженої інсоляції ефективність системи зменшується, що є характерною особливістю фотоелектричних установок. У таких режимах повне покриття всього добового навантаження може бути ускладненим, однак система залишається придатною для живлення критично важливих споживачів. Це підтверджує доцільність поділу навантаження на пріоритетне та другорядне, а також необхідність впровадження елементів енергоменеджменту.

Проведений аналіз показав, що для підвищення ефективності автономної системи доцільно застосовувати керування навантаженням. Зокрема, роботу потужних побутових приладів бажано переносити на денний період, коли сонячна генерація є найбільшою. Крім того, у разі зниження стану заряду акумулятора доцільно автоматично обмежувати некритичні споживачі, залишаючи в роботі лише обладнання, необхідне для забезпечення базових потреб будинку.

Отримані результати свідчать, що розроблена автономна фотоелектрична система є технічно працездатною та може використовуватися для забезпечення електропостачання приватного будинку. Обрана конфігурація дозволяє підвищити надійність живлення, зменшити залежність від централізованої мережі та забезпечити резервування основних електроприймачів у разі відключення електроенергії.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Masters G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. – Hoboken: Wiley, 2013.
2. Messenger R., Ventre J. Photovoltaic Systems Engineering. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2010.
3. Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. – 2nd ed. – Academic Press, 2014.
4. Linden D., Reddy T. B. Handbook of Batteries. – 4th ed. – McGraw-Hill, 2011.
5. Plett G. L. Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling. – Artech House, 2015.
6. Goodenough J. B., Park K. S. The Li-ion rechargeable battery: a perspective // Journal of the American Chemical Society. – 2013. – Vol. 135. – P. 1167–1176.
7. NREL. Battery Storage Technology Overview. – National Renewable Energy Laboratory, 2020.
8. Lambert T., Gilman P., Lilienthal P. Micropower system modeling with HOMER // NREL Technical Report, 2006.
9. IEA. Energy Storage Tracking Report. – International Energy Agency, 2021.
10. https://220volt.com.ua/ua/nabor_solnecnyx_panelei_ecoflow_2400_solar_panel_zptsp300/
11. <https://use.com.ua/ua/p1994052331-batareya-litij-zhelezo.html>.
https://www.nkon.nl/ru/victron-multiplus-ii-24v-3000va-70a.html?gad_source=1&gad_campaignid=21848398073&gbraid=0AAAAAD1QO9h4ihpVQhj2MAlthI_mZxjXD&gclid=Cj0KCQjw2MbPBhCSARIsAP3jP9xttD-wf3zzYDw2gbYuQBrw_5SOGIEQdI3FCd7WDyvPGoxsh4jH0lIaAmEdEALw_wcB
12. ДСТУ EN 62305-1:2012. Захист від блискавки. Частина 1. Загальні принципи (EN 62305-1:2011, IDT).
13. ДСТУ EN 62305-3:2021. Блискавкозахист. Частина 3. Фізичні пошкодження будівель (споруд) та небезпека для життя (EN 62305-3:2011, IDT).

14. IEC 60364-7-712:2017. Low-voltage electrical installations – Part 7-712: Requirements for special installations or locations – Solar photovoltaic (PV) power supply systems.