

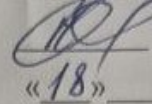
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенеротехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 **Микола ОСТРОВЕРХОВ**
«18» 06 2025 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Електротехнічні пристрої та
електротехнологічні комплекси»**

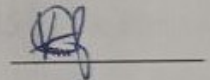
**спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

на тему: «Автономна енергетична система розумного будинку»

Виконав:

студент IV курсу, групи ЕВ-11

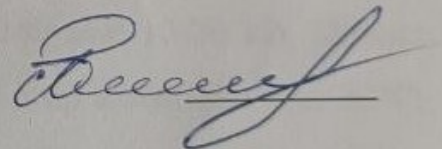
Цимбалюк Вадим Русланович



Керівник:

Доцент, кандидат технічних наук

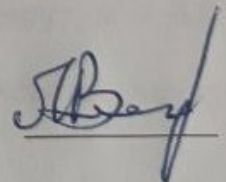
Білецький Олег Олександрович



Рецензент:

Доцент, кандидат технічних наук

Лободзинський Вадим Іорійович



Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент 

Київ – 2025 року

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

Факультет електроенеротехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

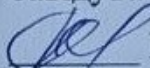
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Микола ОСТРОВЕРХОВ

«20» 05 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

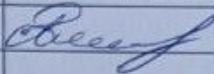
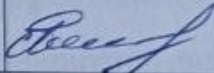
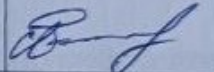
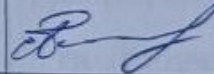
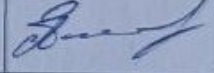
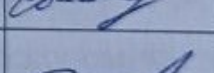
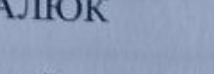
Цимбалюка Вадима Руслановича

1. Тема роботи «Автономна енергетична система розумного будинку», керівник роботи Білецький Олег Олександрович, доцент, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від «28» травня 2025 р. № ~~4720~~-с
2. Термін подання студентом роботи 19.06.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: кабель NA2XS(F)2Y 1×240 мм² 12/20 кВ; Площа поперечного перерізу жили: $S = 240 \text{ мм}^2$; Питомий опір алюмінію при 20°C: $\rho_{20} = 2.8264 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right)$; Температурний коефіцієнт опору: $\alpha = 4.03 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$; Максимальна температура: $\theta_{\max} = 90^\circ\text{C}$; Частота мережі: $f = 50 \text{ Гц}$.
4. Зміст роботи: Дослідження і аналіз ефективності варіантів автономного енергозабезпечення будинків на основі сонячної та вітрової генерації. Розрахунок параметрів гібридної системи. Створення математичної моделі системи у HOMER Pro / MATLAB. Оцінка енергетичної ефективності і економічної доцільності впровадження гібридної системи енергопостачання.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників,

плакатів, презентацій тощо): презентація, доповідь.

6. Дата видачі завдання 20.05.2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка керівника про виконання або не виконання
1.	Робота з літературними джерелами	22.05-24.05	
2.	Огляд технологій гібридних систем відновлювальних джерел енергії для живлення приватного будинку	25.05-28.05	
3.	Розробка моделі автономної гібридної сонячно-вітрової системи для живлення приватного будинку	29.05-01.06	
4.	Імітаційне моделювання автономної гібридної сонячно-вітрової системи для живлення приватного будинку	02.06-04.06	
5.	Технічний аналіз автономної гібридної сонячно-вітрової системи живлення приватного будинку	05.06.-08.06	
6.	Представлення оформленої роботи керівнику	09.06-13.06	
7.	Нормоконтроль	до 14:00 09.06.2025 р	
8.	Перевірка на плагіат	до 14:00 13.06.2025 р.	
9.	Попередній захист	12:00 18.06.2025 р	
10.	Основний захист в очному режимі	10:00 19.06.2025 р. 20.06.2025 р.	

Студент



Вадим ЦИМБАЛЮК

Керівник



Олег БІЛЕЦЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 80 аркушах та містить 6 рисунків, 33 таблиці та 34 літературних посилань.

Актуальність теми. Автономна енергетична система розумного будинку є актуальною через зростаючу потребу в енергонезалежності, економії ресурсів та використанні відновлюваних джерел енергії. Вона сприяє підвищенню комфорту, надійності енергопостачання та відповідає вимогам сталого розвитку.

Об'єкт дослідження — процес енергозабезпечення приватного будинку за допомогою автономної гібридної системи.

Предмет дослідження — структура, параметри та ефективність функціонування гібридної енергетичної системи на базі фотоелектричних панелей, вітрогенератора, акумуляторного блоку та інвертора.

Мета дослідження — обґрунтування доцільності впровадження автономної гібридної енергетичної системи для приватного будинку, розробка її структурної моделі, проведення техніко-економічного аналізу та оцінка ефективності функціонування на основі імітаційного моделювання.

Основні результати.

- Автономна гібридна енергетична система з використанням ВДЕ є ефективним рішенням для стабільного та економічного енергозабезпечення приватного будинку в умовах зростання тарифів і нестабільного доступу до централізованої енергомережі.
- Побудована модель дозволила детально оцінити технічну та економічну ефективність системи, визначити оптимальні параметри її конфігурації, забезпечити мінімізацію втрат енергії та підвищення стабільності енергопостачання.
- Впровадження такої системи є економічно доцільним, особливо в

					ЕВ11.ЕВ1103.002ТП				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Цимбалюк			Автономна енергетична система розумного будинку		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Білецький						4	80
				КПІ ім. Ізгоря Сікорського ФЕА гр. ЕВ-11					
Н. Контр.									
Затверд.		Білецький							

- умовах прогнозованого зростання тарифів на електроенергію, та має виражений екологічний і соціальний ефект.
- Отримані результати можуть бути використані як основа для практичного впровадження подібних рішень, а також для подальших наукових досліджень щодо оптимізації режимів роботи гібридних систем, інтеграції з системами «розумного будинку» та створення енергоефективних екосистем на рівні локальних громад.

Ключові слова: ГІБРИДНА СИСТЕМА, РОЗУМНИЙ ДІМ, ЕНЕРГОНЕЗАЛЕЖНІСТЬ, HOMER, MATLAB, ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ВІТРОГЕНЕРАТОР.

					ЕВ11.ЕВ1103.002ТП							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Цимбалюк			Автономна енергетична система розумного будинку			Літ.		Арк.	Акрушів	
Перевір.		Білецький								5	80	
								КПІ ім. Ізгоря Сікорського ФЕА гр. ЕВ-11				
Н. Контр.												
Затверд.		Білецький										

ABSTRACT

The thesis is made on 80 sheets and contains 6 figures, 33 tables and 34 references.

Relevance of the topic. The autonomous energy system of a smart home is relevant due to the growing need for energy independence, resource saving and the use of renewable energy sources. It contributes to increasing comfort, reliability of energy supply and meets the requirements of sustainable development.

The object of the study is the process of energy supply of a private house using an autonomous hybrid system.

The subject of the study is the structure, parameters and efficiency of the functioning of a hybrid energy system based on photovoltaic panels, a wind generator, a battery pack and an inverter.

The purpose of the study is to substantiate the feasibility of implementing an autonomous hybrid energy system for a private house, develop its structural model, conduct a feasibility analysis and assess the efficiency of functioning based on simulation modeling.

Main results.

- An autonomous hybrid energy system using renewable energy is an effective solution for stable and economical energy supply of a private house in the conditions of rising tariffs and unstable access to the centralized power grid.
- The constructed model allowed for a detailed assessment of the technical and economic efficiency of the system, determination of the optimal parameters of its configuration, minimization of energy losses and increase of stability of power supply.
- The implementation of such a system is economically feasible, especially in the conditions of the projected increase in electricity tariffs, and has a pronounced environmental and social effect.

					ЕВ11.ЕВ1103.002ТП						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Цимбалюк			Автономна енергетична система розумного будинку			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Білецький								6	80
								КПІ ім. Ізгоря Сікорського ФЕА зр. ЕВ-11			
Н. Контр.											
Затверд.		Білецький									

– The obtained results can be used as a basis for the practical implementation of such solutions, as well as for further scientific research on optimizing the operating modes of hybrid systems, integration with "smart home" systems and creation of energy-efficient ecosystems at the level of local communities.

Keywords: HYBRID SYSTEM, SMART HOME, ENERGY INDEPENDENCE, HOMER, MATLAB, ECONOMIC EFFICIENCY, WIND TURBINE.

					ЕВ11.ЕВ1103.002ТП		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Автономна енергетична система розумного будинку		
<i>Розроб.</i>		Цимбалюк					
<i>Перевір.</i>		Білецький					
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Затверд.</i>		Білецький					
					<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
						7	80
					КПІ ім. Ізоря Сікорського ФЕА гр. ЕВ-11		

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи автономного енергозабезпечення	11
1.1 Огляд сучасних літературних джерел щодо енергозабезпечення будинків	11
1.2 Класифікація джерел відновлювальної енергії.....	14
1.3 Технології гібридних систем автономного живлення: сонячна та вітрова енергетика	17
РОЗДІЛ 2. Розробка моделі автономної гібридної системи	22
2.1 Вихідні дані для моделювання системи (кліматичні умови, споживання, тип будинку)	22
2.2 Структура автономної гібридної системи живлення (фотоелектричні панелі, вітрогенератори, акумулятори, інвертори)	29
2.3 Розрахунок потужностей елементів системи	37
РОЗДІЛ 3. Імітаційне моделювання та аналіз ефективності	47
3.1 Імітаційне моделювання автономної гібридної системи в спеціалізованому ПЗ (Homer, Matlab/Simulink тощо)	47
3.1.1 Практична частина моделювання в HOMER Pro	49
3.1.2 Практична частина моделювання в MATLAB/Simulink.....	50
3.2 Аналіз технічної ефективності роботи системи	56
3.3 Економічне обґрунтування впровадження автономної системи у приватному будинку	65
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78

ВСТУП

У сучасних умовах зростання вартості традиційних енергоносіїв, а також нестабільності енергетичного постачання в багатьох регіонах України, питання впровадження автономних енергетичних систем набуває особливої актуальності. Підвищення рівня енергетичної незалежності приватних домоволодінь, зменшення навантаження на централізовану електромережу, розвиток зеленої енергетики та використання відновлюваних джерел енергії є ключовими завданнями національної енергетичної стратегії та відповідають глобальним викликам сталого розвитку. Одним із ефективних рішень у цьому напрямі є використання гібридних автономних енергетичних систем, які поєднують сонячну, вітрову та резервну генерацію з накопиченням енергії, дозволяючи забезпечити стабільне електропостачання незалежно від зовнішніх умов.

Особливої важливості набуває впровадження таких рішень у приватному секторі, де часто відсутнє надійне підключення до централізованої мережі, а споживачі мають можливість інвестувати у власну інфраструктуру. Завдяки поєднанню різних типів генерації та накопичення енергії, гібридна система здатна забезпечити високу автономність, стабільність роботи, оптимізацію витрат, а також зниження викидів вуглекислого газу. При цьому ефективне проєктування такої системи вимагає урахування багатьох факторів — кліматичних умов, структури споживання, топології будинку, економічних обмежень, що зумовлює потребу у комплексному техніко-економічному дослідженні.

Завдання дослідження:

- 1) Проаналізувати сучасні наукові та технічні джерела щодо автономного енергозабезпечення будинків.
- 2) Узагальнити класифікацію та технічні характеристики відновлюваних джерел енергії.
- 3) Визначити структуру та принцип роботи гібридної енергетичної системи з поєднанням сонячної та вітрової генерації.

- 4) Зібрати вихідні дані для моделювання (кліматичні умови, енергоспоживання, параметри будинку).
- 5) Провести розрахунки потужності основних компонентів системи — генераторів, акумуляторів, інвертора.
- 6) Створити математичну модель системи в середовищі HOMER Pro та/або MATLAB/Simulink.
- 7) Проаналізувати стабільність енергопостачання, автономність, рівень втрат і технічну надійність системи.
- 8) Розрахувати витрати на реалізацію системи та провести аналіз строку окупності та економічної доцільності проєкту.

Методи дослідження включають: системний аналіз, техніко-економічне моделювання, математичне моделювання в спеціалізованому ПЗ, порівняльний аналіз альтернативних джерел енергії, а також візуалізацію результатів за допомогою діаграм, графіків та схем.

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному підході до побудови і моделювання гібридної автономної енергетичної системи з урахуванням реальних кліматичних, технічних та економічних умов, а також у визначенні оптимальних параметрів для забезпечення максимальної енергоефективності та мінімізації втрат енергії.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

1.1 Огляд сучасних літературних джерел щодо енергозабезпечення будинків

У сучасних умовах розвитку енергетичного сектору питання енергозабезпечення житлових будинків набуває особливого значення, особливо з урахуванням зростання цін на енергоносії, загострення екологічних проблем та поширення концепцій енергонезалежності й сталого розвитку. Вивчення літературних джерел з цієї тематики свідчить про активне зацікавлення науковців, інженерів та практиків розробкою ефективних моделей автономного та відновлюваного енергозабезпечення, а також впровадженням таких систем у житловому секторі. Значна увага приділяється використанню сонячної, вітрової, геотермальної енергії, а також комбінованим системам, що поєднують різні джерела енергії для досягнення максимальної автономності та енергоефективності [1].

Одним із ключових джерел, що відображає сучасні тенденції розвитку енергетики, є звіти Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), в яких наголошується на необхідності зменшення залежності від викопного палива та переходу до децентралізованих, екологічно чистих систем. Дослідження, проведені у країнах Європейського Союзу, зокрема в Німеччині, Швеції, Нідерландах, демонструють ефективність переходу до відновлювальних джерел енергії на рівні приватних домоволодінь. У більшості з них успішно реалізовано системи, в яких основним джерелом енергії є фотоелектричні панелі, що поєднуються з акумулювальними пристроями та допоміжними джерелами, зокрема тепловими насосами чи вітрогенераторами [2].

Аналіз українських джерел також показує зростаючий інтерес до автономних систем живлення в умовах підвищеної нестабільності електропостачання, особливо на тлі військових подій та проблем з енергетичною інфраструктурою. У працях українських науковців, таких як С. Савчук, О. Козак, В. Коваль, обґрунтовано перспективи впровадження гібридних систем енергопостачання, що включають фотоелектричні установки, вітрові турбіни, резервні генератори та системи

акумулювання енергії. Дослідження цих авторів також охоплюють порівняльний аналіз енергоефективності будинків, які використовують лише один тип джерела енергії, та тих, де застосовується гібридний підхід [3].

У працях багатьох дослідників відзначається важливість правильного моделювання навантаження та енергетичного профілю споживання будинку як ключової передумови для ефективного проектування автономної системи. Наприклад, у публікаціях А. Katti та М. Khedkar (2021), де досліджено енергетичний профіль сільських домогосподарств в Індії, підкреслюється необхідність врахування сезонних змін, пікових навантажень та режиму роботи приладів, що істотно впливає на вибір конфігурації системи та її вартість [4].

Іншим важливим напрямом є розвиток систем інтелектуального керування енергетичними потоками, або так званих smart grid-рішень, які забезпечують оптимальний розподіл виробленої енергії між споживачами, акумуляторами та зовнішньою мережею (у разі гібридних рішень з можливістю підключення до централізованої мережі) [5]. У наукових публікаціях авторів, таких як D. Manzano (2020), розглядаються інноваційні алгоритми керування, які застосовують методи штучного інтелекту для прогнозування генерації енергії та управління навантаженням у будинку [6, 7].

Дослідження, присвячені екологічному аспекту автономних енергетичних систем, зокрема роботи J. Twidell та A. Weir, підкреслюють, що використання ВДЕ в домогосподарствах дозволяє зменшити викиди парникових газів, знизити споживання невідновлюваних ресурсів та позитивно вплинути на мікроклімат населених пунктів. Водночас підкреслюється, що недостатньо лише технічного впровадження — успіх реалізації залежить від підтримки на рівні державної політики, економічних стимулів, освітніх кампаній та підвищення обізнаності населення [8].

У технічній літературі та галузевих дослідженнях широко представлено огляди технічних характеристик фотоелектричних модулів, акумуляторних систем та вітрових турбін. Наприклад, у статтях, опублікованих у журналах *Renewable Energy*, *Applied Energy*, *Energy Conversion and Management*, аналізуються переваги

та недоліки різних типів акумуляторів — свинцево-кислотних, літій-іонних, твердотілих — із погляду тривалості роботи, глибини розряду, ефективності перетворення та вартості. Також значна увага приділяється питанням деградації фотоелектричних елементів та зниженню їх продуктивності з часом, що є критично важливим при проектуванні систем з тривалим терміном експлуатації [9, 10].

Питання економічної доцільності автономних енергетичних систем розкриваються у працях аналітичних центрів та дослідницьких інститутів, таких як NREL (National Renewable Energy Laboratory, США), які розробляють моделі LCOE (Levelized Cost of Energy), що дозволяють оцінити середню вартість кіловат-години енергії протягом усього життєвого циклу системи. Ці моделі активно застосовуються в порівняльному аналізі традиційних і альтернативних джерел енергії для приватного сектору, і результати свідчать про поступове зниження вартості відновлювальної енергії, особливо за умов державного субсидування.

Значний обсяг наукових праць присвячено проблемам адаптації енергетичних систем до різних кліматичних зон. Так, у публікаціях Н. Lund та співавторів розглядається застосування концепції "розумного будинку" (smart home) з інтеграцією енергозберігаючих технологій, систем пасивного опалення та вентиляції, а також накопичення надлишкової енергії для її подальшого використання в пікові години. Системи, побудовані за такою концепцією, виявили високу ефективність у країнах з холодним та помірним кліматом [10].

Таким чином, сучасні літературні джерела створюють цілісне уявлення про перспективи автономного енергозабезпечення приватного будинку як із технічного, так і з економічного погляду. Більшість авторів сходяться на думці, що майбутнє за децентралізованими системами енергопостачання, які базуються на використанні відновлюваних джерел енергії, інтелектуальному управлінні, адаптації до локальних умов і залученні споживачів як активних учасників енергетичного ринку. На цьому тлі актуальними залишаються дослідження моделей оптимізації конфігурації таких систем, пошуку балансів між витратами та ефективністю, а також розробка політик, що стимулюють їх широкомасштабне впровадження в побутовому секторі [11].

1.2 Класифікація джерел відновлювальної енергії

Джерела відновлювальної енергії становлять одну з найважливіших складових сучасної енергетичної стратегії, спрямованої на підвищення енергетичної безпеки, зниження залежності від викопного палива, пом'якшення кліматичних змін і перехід до сталої моделі розвитку. У науковій та технічній літературі джерела відновлюваної енергії зазвичай класифікують за видом природного ресурсу, з якого вони отримуються, а також за технічними, географічними, економічними та екологічними характеристиками. Найбільш поширеними джерелами є сонячна, вітрова, гідроенергія, біоенергія та геотермальна енергія. Кожен із цих типів має свої особливості, переваги й обмеження, які визначають можливості їх застосування в конкретних умовах.

Сонячна енергія є одним із найперспективніших джерел, завдяки доступності, екологічній чистоті та широкому спектру застосування. Вона перетворюється на електричну енергію за допомогою фотоелектричних елементів (сонячних панелей) або на теплову – через колектори. Фотоелектричні системи активно використовуються у житловому секторі, особливо в умовах наявності сприятливого клімату з високою інсоляцією. Ефективність перетворення сонячного світла в електроенергію залежить від типу панелей (моно- або полікристалічні, тонкоплівкові), кута їх нахилу, орієнтації, а також кліматичних умов. Однією з головних переваг сонячної енергетики є відсутність рухомих частин, що знижує потребу в технічному обслуговуванні. Водночас недоліками залишаються залежність від погодних умов та зниження ефективності в похмурі дні й уночі, що потребує використання систем накопичення енергії або резервних джерел живлення [12].

Вітрова енергія використовується шляхом перетворення кінетичної енергії вітру в електричну за допомогою вітрогенераторів. Цей вид джерел відновлюваної енергії є особливо ефективним у регіонах з постійним і сильним вітром, наприклад, у прибережних або відкритих рівнинних місцевостях. Вітрові турбіни можуть бути горизонтального або вертикального типу залежно від напрямку обертання валу. Їх

переваги включають високу енергетичну віддачу в умовах належної інсоляції, а також можливість використання в гібридних системах разом із сонячними панелями для взаємного доповнення в періоди, коли одна з технологій менш ефективна. До недоліків належать шум, вплив на пейзаж, можливе втручання у життя птахів і тварин, а також нестабільність генерації, що потребує застосування стабілізуючих технологій, таких як акумулятори або системи керування навантаженням [13].

Гідроенергія, яка отримується шляхом використання енергії потоку води, зокрема річок і водоспадів, є одним із найстаріших і водночас найнадійніших джерел відновлюваної енергії. Вона поділяється на малі (до 10 МВт), середні та великі гідроелектростанції. У контексті автономного енергозабезпечення житлових будинків особливу увагу приділяють мікро- та міні-ГЕС, які можуть забезпечувати електроенергією окремі домогосподарства або малі громади. Перевагами таких систем є постійність генерації за наявності сталого потоку води, низькі експлуатаційні витрати та тривалий термін служби обладнання. Проте широке впровадження гідроенергетики обмежується необхідністю специфічного географічного середовища – наявності водойм із достатнім перепадом висоти та об'ємом потоку [14].

Геотермальна енергія отримується з тепла, що накопичується у надрах Землі, і використовується для опалення будинків, підігріву води або вироблення електроенергії на геотермальних електростанціях. У побутовому секторі найчастіше застосовують теплові насоси, що працюють за принципом вилучення тепла з ґрунту, води чи повітря і передавання його до системи опалення. Ці системи мають високу енергоефективність, особливо в поєднанні з низькотемпературними системами обігріву (теплі підлоги, радіатори з великою площею поверхні). Основні переваги геотермальної енергії включають сталість джерела, відсутність викидів і здатність забезпечувати теплову енергію впродовж усього року. Водночас недоліками є високі початкові інвестиції, складність монтажу, зокрема буріння свердловин, а також вимоги до геологічної будови ділянки [15].

Біоенергія передбачає використання органічних відходів, деревини, біогазу, пелет або біоетанолу для отримання теплової та електричної енергії. Вона вважається умовно відновлювальною, оскільки в процесі горіння виділяється CO_2 , проте баланс досягається за рахунок поглинання вуглецю під час росту рослин. У приватних будинках найчастіше використовують твердопаливні котли на дровах або пелетах, а також біогазові установки у випадку наявності власного джерела сировини (фермерські господарства, агропідприємства). Серед переваг – незалежність від погодних умов, відносна доступність палива, можливість використання місцевих ресурсів. Проте використання біоенергії пов'язане з потребою у значному фізичному просторі для зберігання палива, частому обслуговуванні та виділенням диму й золи, що потребує ефективних систем вентиляції та очищення повітря [16, 17].

Крім наведених основних категорій, до джерел відновлювальної енергії також відносять енергію морських припливів і хвиль, а також водню, отриманого з ВДЕ шляхом електролізу. Ці напрямки наразі є менш поширеними в житловому секторі, однак активно досліджуються як потенційні резервні та масштабовані рішення на майбутнє. Наприклад, воднева енергетика дає змогу акумулювати надлишок електроенергії у вигляді водню, який потім використовується для генерації електроенергії або як паливо. Такі технології є перспективними з погляду енергетичної незалежності, проте потребують подальшого зниження вартості, підвищення безпеки та розвитку інфраструктури.

У контексті класифікації джерел відновлювальної енергії варто також враховувати часову доступність (постійні або змінні), локалізацію (централізовані або децентралізовані), сезонність, екологічне навантаження та відповідність до вимог сталого розвитку. Наприклад, сонячна і вітрова енергія мають високий потенціал, але характеризуються періодичністю, що потребує застосування додаткових технічних рішень для балансування навантаження. Геотермальні джерела та біоенергія можуть забезпечувати більш стабільну генерацію, але мають більші вимоги до інфраструктури та обслуговування. Тому для забезпечення надійного, безпечного та економічно обґрунтованого енергозабезпечення часто

застосовують **гібридні системи**, які комбінують декілька типів джерел енергії з урахуванням місцевих умов [18, 19, 20].

Загалом класифікація джерел відновлюваної енергії є не лише теоретичним інструментом систематизації знань, а й практичним орієнтиром для прийняття техніко-економічно обґрунтованих рішень при розробці автономних систем енергозабезпечення житлових будинків. Вибір конкретного джерела або їх комбінації залежить від низки чинників: кліматичних, економічних, технічних, правових, екологічних та соціальних. Саме цілісний, міждисциплінарний підхід до аналізу цих джерел дає змогу забезпечити ефективну реалізацію проєктів децентралізованої енергетики у межах розумного будинку, підвищуючи якість життя споживачів, зменшуючи викиди вуглецю та сприяючи загальній енергетичній трансформації суспільства [18].

1.3 Технології гібридних систем автономного живлення: сонячна та вітрова енергетика

Гібридні системи автономного живлення, що поєднують сонячну та вітрову енергетику, становлять одну з найефективніших моделей децентралізованого енергозабезпечення, особливо в умовах нестабільного централізованого електропостачання або його повної відсутності. Поєднання двох типів відновлюваних джерел дозволяє компенсувати недоліки кожного з них і забезпечити більш стабільне та безперервне постачання енергії споживачеві. Такі системи активно впроваджуються у житловому, комерційному, аграрному та телекомунікаційному секторах, особливо у віддалених або сільських регіонах, де підключення до централізованої мережі є економічно не вигідним або технічно неможливим.

Основою будь-якої гібридної енергетичної системи є інтеграція різних джерел генерації, акумулювання та споживання електроенергії в єдиний керований комплекс. У випадку комбінації сонячної та вітрової енергії використовується синергія двох природних явищ — інсоляції та вітру, що мають різну добову і

сезонну динаміку. Наприклад, у денний час і влітку, коли сонячне випромінювання найбільш інтенсивне, основним джерелом електроенергії виступають фотоелектричні модулі. Натомість у нічний час, взимку або під час хмарної погоди, коли генерація сонячної енергії знижується, її доповнює енергія вітру. Такий підхід дозволяє уникнути надмірного навантаження на накопичувальні елементи (акумулятори) та зменшити розмір резервних джерел живлення, що значно підвищує загальну ефективність і знижує вартість системи в довгостроковій перспективі [8].

Основними компонентами гібридної системи є сонячні фотоелектричні панелі, вітрогенератори, акумуляторні батареї, контролери заряду, інвертори, а також система моніторингу та керування. Сонячні панелі складаються з напівпровідникових елементів, що перетворюють сонячне випромінювання безпосередньо в електричну енергію постійного струму. Залежно від матеріалу виготовлення вони можуть бути монокристалічними, полікристалічними або тонкоплівковими. Монокристалічні панелі мають найвищу ефективність, але також і вищу вартість. Вітрогенератори перетворюють кінетичну енергію повітряних потоків у механічну, а потім — у електричну, за допомогою генераторів змінного або постійного струму. Найбільш поширеними є турбіни з горизонтальною віссю обертання, які мають високу продуктивність, але потребують достатнього простору та правильної орієнтації щодо напрямку вітру.

Контролери заряду регулюють подачу енергії з джерел до акумуляторів, запобігаючи їх перенапруженню або надмірному розрядженню. У сучасних системах використовуються так звані MPPT-контролери (Maximum Power Point Tracking), які забезпечують роботу фотоелектричних панелей у точці максимальної потужності, що значно підвищує ефективність використання сонячної енергії. Акумуляторні батареї накопичують надлишкову енергію для подальшого використання в нічний час або у періоди низької генерації. Найпоширенішими є свинцево-кислотні та літій-іонні акумулятори, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Свинцево-кислотні є дешевшими, але мають меншу глибину розряду

та коротший термін служби, тоді як літєві — дорожчі, але більш компактні, довговічні й ефективні[21].

Інвертори перетворюють електроенергію постійного струму, накопичену в акумуляторах або отриману з джерел, у змінний струм, що використовується більшістю побутових приладів. У гібридних системах використовуються інвертори з розширеним функціоналом, які здатні синхронізувати роботу декількох джерел, підтримувати якість напруги, а також за потреби — працювати в автономному або мережевому режимі (у разі підключення до централізованої енергосистеми). У сучасних проєктах також широко застосовуються енергетичні контролери з функціями IoT, що дозволяють дистанційно відстежувати стан системи, оптимізувати режими її роботи, передбачати пікові навантаження та зменшувати споживання [2].

Реалізація гібридних систем автономного живлення вимагає попереднього техніко-економічного обґрунтування, що включає розрахунок середньодобового та сезонного споживання енергії, аналіз інсоляції та вітрового потенціалу місцевості, вибір відповідної конфігурації системи, розрахунок потужності кожного елемента, а також оцінку ефективності та терміну окупності. Такі розрахунки часто проводяться за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, зокрема HOMER, PVSyst, Matlab/Simulink, які дозволяють моделювати динаміку роботи системи впродовж року з урахуванням зміни кліматичних умов, змін навантаження та втрат у мережі[22].

Значну увагу у дослідженнях гібридних систем приділено проблемі забезпечення стабільності енергопостачання. У літературі описані підходи до побудови систем з надлишковою потужністю джерел (oversizing), що дозволяє забезпечити енергетичний резерв у критичних умовах. Альтернативним підходом є застосування прогнозних моделей і адаптивного керування споживанням, які дозволяють не тільки зменшити потребу в накопичувачах, але й мінімізувати втрати та знизити витрати на експлуатацію. Також актуальним є питання інтеграції гібридної системи у локальні енергетичні мережі (microgrid), що дозволяє

об'єднувати декілька домогосподарств у єдину енергетичну мережу з розподілом ресурсів та підвищенням надійності.

Гібридні системи мають низку переваг порівняно з традиційними автономними системами, які працюють на одному джерелі енергії. Насамперед це підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності, зниження потреби у великому обсязі акумуляторів, збільшення тривалості автономної роботи, зменшення залежності від погодних умов, а також можливість адаптації до змінних умов експлуатації. У той же час такі системи мають складнішу структуру, вищу вартість проектування та монтажу, а також вимагають більш кваліфікованого обслуговування.

Особливий інтерес становлять результати впровадження гібридних систем у житловому секторі. У країнах Європи, США, Японії існують численні приклади ефективної реалізації таких проєктів, що дозволили не тільки знизити витрати на електроенергію, а й підвищити рівень енергетичної автономії громадян. Згідно з дослідженнями Європейського агентства з навколишнього середовища, гібридні системи здатні забезпечувати до 90–100% потреб домогосподарства в енергії у сприятливих кліматичних умовах. В Україні цей напрям почав активно розвиватися в останнє десятиліття, особливо після запуску програми "Зелений тариф", яка стимулює використання відновлюваної енергії в приватному секторі. В умовах енергетичної кризи, викликаній військовими діями, гібридні системи стали не лише альтернативним джерелом живлення, а й критично важливим елементом енергетичної безпеки.

Загалом, гібридні системи, що поєднують сонячну та вітрову енергетику, є однією з найперспективніших технологій у галузі автономного енергозабезпечення. Вони дозволяють досягти високого рівня надійності, ефективності та сталості, що відповідає вимогам сучасного розумного будинку. Їх подальший розвиток потребує вдосконалення технічних рішень, зниження вартості компонентів, підтримки з боку держави та розширення обізнаності споживачів щодо переваг децентралізованої енергетики. У сукупності ці фактори сприятимуть

більш широкому впровадженню гібридних технологій як на рівні окремих домогосподарств, так і в масштабах цілих регіонів [6].

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ АВТОНОМНОЇ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Вихідні дані для моделювання системи (кліматичні умови, споживання, тип будинку)

Аналіз кліматичних умов і енергоспоживання є ключовим етапом у проєктуванні автономної енергосистеми для приватного будинку, оскільки саме ці чинники визначають конфігурацію системи, вибір типу та кількості обладнання, потенціал генерації електроенергії та її сезонну динаміку. Адекватне врахування кліматичних характеристик дозволяє максимально ефективно використовувати відновлювані джерела енергії, зокрема сонячну та вітрову, а також мінімізувати розмір і вартість накопичувальних елементів. У рамках цього дослідження було здійснено оцінку кліматичних параметрів регіону, а також аналіз споживання електроенергії типовим приватним будинком площею 120 м², у якому постійно проживає родина з чотирьох осіб[23].

Для проведення аналізу кліматичних умов обрано Київську область, яка характеризується помірно континентальним кліматом із достатнім рівнем сонячної інсоляції та помірною вітровою активністю. Середньорічна кількість сонячних годин у регіоні становить близько 1800–2000 годин, що створює сприятливі умови для ефективного використання фотоелектричних панелей. Вітрова активність коливається в межах 2–4 м/с, що є прийнятним показником для експлуатації малопотужних побутових вітрогенераторів.

У таблиці 2.1 подано середньомісячні значення сонячної інсоляції та середньої швидкості вітру для Київської області.

Таблиця 2.1 – Середньомісячна інсоляція та швидкість вітру у Київській області (Джерело: Meteonorm, Укргідрометцентр)

Місяць	Середня інсоляція, кВт·год/м ²	Середня швидкість вітру, м/с
Січень	35	3,6
Лютий	60	3,9
Березень	110	4,2
Квітень	140	4,0
Травень	180	3,7
Червень	210	3,5
Липень	220	3,4
Серпень	200	3,3
Вересень	150	3,2
Жовтень	100	3,4
Листопад	60	3,6
Грудень	30	3,8
Рік	1495	3,6 (середнє значення)

Як видно з таблиці, найвищий рівень інсоляції спостерігається в літні місяці — з червня по серпень, що дозволяє покривати значну частину споживання електроенергії за рахунок сонячних панелей. У зимові місяці, коли інсоляція мінімальна, зростає значення вітрової енергії, яка, хоч і не демонструє різких піків, проте є стабільнішою порівняно з сонячною генерацією в цей період[24].

З метою адекватного підбору конфігурації гібридної енергосистеми було здійснено аналіз енергоспоживання приватного будинку середніх розмірів. Прийнято, що загальна площа будинку становить 120 м², він добре утеплений, оснащений енергоощадною технікою та має стандартне енергоспоживання для домогосподарства з чотирьох осіб. До складу електроспоживачів входять: освітлення, побутова техніка (холодильник, пральна машина, мікрохвильова піч,

телевізори, комп'ютери), система опалення з електричним котлом, бойлер для гарячої води, вентиляція та інші дрібні споживачі [7]. Оцінка середньомісячного енергоспоживання представлена у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Середньомісячне електроспоживання приватного будинку (кВт·год)

Місяць	Освітлення	Побутова техніка	Опалення	Всього споживання
Січень	80	150	400	630
Лютий	70	140	350	560
Березень	70	130	250	450
Квітень	60	120	150	330
Травень	50	120	50	220
Червень	50	130	0	180
Липень	60	140	0	200
Серпень	60	140	0	200
Вересень	60	130	50	240
Жовтень	70	130	150	350
Листопад	70	140	300	510
Грудень	80	150	400	630
Рік	—	—	—	4500

Як показує аналіз, найбільші навантаження припадають на зимові місяці, коли зростає споживання електроенергії на опалення. Влітку, навпаки, навантаження зменшується, що відповідає періоду пікової сонячної генерації. Це підтверджує доцільність застосування гібридної системи, де надлишок сонячної енергії влітку може накопичуватися або частково компенсувати інші потреби, тоді як взимку її дефіцит може бути компенсований вітровою генерацією.

Для подальших розрахунків прийнято, що середньодобове енергоспоживання становить приблизно 12,3 кВт·год. На підставі цього обчислюється потрібна потужність джерел генерації з урахуванням ККД системи,

втрат у мережі, акумуляції та коефіцієнта використання встановленої потужності. Також важливо враховувати пікові навантаження, які можуть виникати під час одночасної роботи кількох приладів — наприклад, бойлера, електричного котла та пральної машини, що створює необхідність забезпечення достатньої пікової потужності інверторів і акумуляторів[25].

Отже, аналіз кліматичних параметрів та профілю електроспоживання свідчить про наявність усіх передумов для ефективного впровадження гібридної автономної енергетичної системи, яка поєднує сонячну та вітрову генерацію. Ця інформація слугуватиме базою для подальшого проектування структури системи, підбору обладнання, розрахунків потужностей та імітаційного моделювання її роботи. Такий підхід дозволяє досягти балансу між технічною ефективністю, надійністю та економічною доцільністю впровадження автономного енергозабезпечення в умовах типового приватного будинку в Центральній Україні [20].

Вибір типу будинку та його енергетичних характеристик має фундаментальне значення при проектуванні автономної гібридної енергосистеми, оскільки саме від архітектурно-конструктивних параметрів будівлі, її площі, теплоізоляційних властивостей, кількості мешканців та стилю їхнього життя залежать рівень енергоспоживання, структура споживання, характер навантажень та оптимальна конфігурація джерел енергії. У цьому дослідженні як базовий об'єкт для моделювання обрано типовий одноповерховий приватний будинок площею 120 м², з горищем і системою електричного опалення. Будинок побудовано із сучасних теплоізоляційних матеріалів, що відповідають вимогам енергоефективності згідно з ДБН В.2.6-31:2021 "Теплова ізоляція будівель"[26].

Будівля складається з чотирьох житлових кімнат, кухні, санвузла, коридору, технічного приміщення та горища. У ній постійно проживає сім'я з чотирьох осіб. Конструкція даху передбачає можливість встановлення фотоелектричних панелей, а прибудинкова ділянка має відкриту рівнинну місцевість, що є доцільним для розміщення вітрогенератора малої потужності. Встановлені двокамерні енергоефективні вікна, мінераловатна теплоізоляція стін товщиною 150 мм,

вентильований фасад і дах із додатковим утепленням. Ці рішення дозволяють знизити теплові втрати та покращити загальний енергетичний баланс будинку[27, 28].

З метою деталізації енергетичних характеристик об'єкта було складено розрахунок втрат тепла через основні елементи будівлі та їхній внесок у загальні енергетичні витрати. Для цього застосовано методику теплотехнічного розрахунку згідно з чинними будівельними нормами. Площі та теплова характеристика огорожувальних конструкцій будинку вказані в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Площі та теплова характеристика огорожувальних конструкцій будинку

Елемент конструкції	Площа, м ²	Коефіцієнт теплопередачі, Вт/м ² ·К	Тепловтрати при $\Delta T=25^{\circ}\text{C}$, Вт
Стіни (утеплені)	110	0,23	632,5
Вікна (енергоефективні)	18	1,00	450
Дах (з утепленням)	120	0,20	600
Підлога на ґрунті	120	0,30	900
Всього	—	—	2582,5

Отже, за умов зовнішньої температури -5°C (різниця температур $\Delta T = 25^{\circ}\text{C}$ при внутрішній 20°C), орієнтовні тепловтрати будівлі становлять близько 2,58 кВт. Це дає змогу визначити необхідну потужність системи опалення в екстремальних зимових умовах. Враховуючи денну тривалість роботи системи опалення 10 годин, добова потреба в електроенергії на опалення становитиме приблизно 25,8 кВт·год. У поєднанні з енергоспоживанням побутових приладів та освітлення загальна потреба в електроенергії може досягати 35–40 кВт·год на добу в зимовий період.

Наступним кроком було проведено аналіз структури електроспоживання на основі розподілу основних споживачів. Було визначено середню потужність,

тривалість роботи та середньодобове споживання кожної категорії електроприладів у будинку [29, 30].

В таблиці 2.4 показані показники енергоспоживання основних електроприладів у приватному будинку.

Таблиця 2.4 – Енергоспоживання основних електроприладів у приватному будинку

Категорія споживачів	Прилад	Потужність, Вт	Час роботи, год/добу	Споживання, кВт·год/добу
Освітлення	Світлодіодні лампи (10 шт)	100	6	0,6
Кухонна техніка	Холодильник	120	24	1,6
	Мікрохвильова піч	1000	0,5	0,5
	Електрочайник	1500	0,3	0,45
	Варильна поверхня	3000	1	3,0
Гігієна та водопостачання	Бойлер 80 л	2000	2	4,0
Комфорт	Телевізор (2 шт)	200	4	0,8
	Комп'ютер	250	3	0,75
	Wi-Fi роутер	20	24	0,48
Опалення	Електричний котел	3000	10	30,0
Разом	—	—	—	42,18

Як свідчить таблиця, основна частка енергоспоживання припадає на опалення, водонагрівач та кухонну техніку. Водночас електроприлади, що працюють тривалий час, але мають малу потужність (наприклад, холодильник,

роутер), забезпечують стабільне навантаження протягом доби. Це важливо для оцінки потреби в акумуляторному резерві та визначення профілю споживання.

Для підвищення точності моделювання конфігурації енергосистеми також було проведено симуляцію щогодинного енергоспоживання на прикладі типової доби в зимовий та літній періоди. У зимовий період характерна наявність пікових навантажень зранку та ввечері, пов'язаних із роботою опалення та кухонної техніки, тоді як улітку споживання є рівномірнішим, без опалення. Щоденне споживання показано в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Щогодинне електроспоживання в зимовий період (типова доба)

Година доби	Потужність навантаження, Вт	Година доби	Потужність навантаження, Вт
00:00–01:00	400	12:00–13:00	1600
01:00–02:00	300	13:00–14:00	1700
02:00–03:00	300	14:00–15:00	1500
03:00–04:00	300	15:00–16:00	1800
04:00–05:00	350	16:00–17:00	2000
05:00–06:00	500	17:00–18:00	2200
06:00–07:00	800	18:00–19:00	2500
07:00–08:00	2500	19:00–20:00	2700
08:00–09:00	2200	20:00–21:00	2400
09:00–10:00	1800	21:00–22:00	1500
10:00–11:00	1500	22:00–23:00	1000
11:00–12:00	1400	23:00–00:00	600

Загальне енергоспоживання за добу становить близько 42 кВт·год. Враховуючи вищезгадану структуру, саме у вечірній час має працювати акумуляторна система або додаткове джерело енергії, зокрема вітрогенератор. Удень можна забезпечити живлення від сонячних панелей [31].

Отже, проведений аналіз дає змогу зробити висновок, що обраний тип будинку належить до категорії середньоенергоспоживаючих приватних осель. Його енергетичні характеристики відповідають сучасним стандартам енергоефективності. Це дозволяє зменшити навантаження на систему живлення, знизити потребу в великих об'ємах акумуляторів та оптимізувати вартість впровадження автономної гібридної системи. Всі розрахункові дані будуть використані у наступному етапі — при формуванні структури системи та розрахунку потужностей її окремих елементів [32].

2.2 Структура автономної гібридної системи живлення (фотоелектричні панелі, вітрогенератори, акумулятори, інвертори)

У рамках проєктування автономної гібридної енергетичної системи для приватного будинку ключовими компонентами, що відповідають за генерацію електроенергії, є фотоелектричні панелі та вітрогенератори. Саме ці два елементи забезпечують основну частину виробництва енергії за рахунок використання відновлюваних джерел — сонячної інсоляції та кінетичної енергії вітру. Їх правильний вибір, технічне обґрунтування та взаємна узгодженість визначають ефективність, надійність та економічну доцільність всієї енергосистеми. Розгляд кожного з компонентів базується на аналізі потужності, продуктивності, технічних характеристик, умов експлуатації та відповідності кліматичним особливостям регіону — у цьому випадку, Київської області.

Фотоелектричні панелі є основним джерелом генерації електроенергії в автономній системі протягом сонячної частини доби, особливо в період із квітня по вересень, коли рівень інсоляції є найвищим[33]. Для реалізації системи було обрано монокристалічні кремнієві модулі завдяки їхній вищій ефективності, що становить у середньому 18–22%. До їх переваг належать компактність, довговічність (термін служби до 25–30 років), стабільна робота при низьких рівнях освітлення, а також низьке падіння потужності з часом[34].

Для забезпечення базової потреби в електроенергії, яка згідно з попередніми розрахунками становить 35–40 кВт·год/добу у зимовий період і 15–25 кВт·год/добу влітку, було проведено розрахунок необхідної потужності фотоелектричних панелей з урахуванням річної інсоляції та втрат на інвертацію, температурний коефіцієнт та інші фактори [25]. Дані панелей показано в таблиці 2.6

Таблиця 2.6 – Вихідні дані для вибору фотоелектричних панелей

Параметр	Значення
Середньорічна інсоляція в Київській обл.	1495 кВт·год/м ²
Ефективність панелей	19%
Коефіцієнт системних втрат	0.75
Цільове річне споживання	12000 кВт·год
Необхідна площа генерації	≈10–12 кВт встановленої потужності

Отже, для задоволення річного попиту на електроенергію у 12000 кВт·год потрібно встановити близько 10–12 кВт фотоелектричних панелей. Якщо врахувати, що один монокристалічний модуль має потужність близько 400 Вт і площу близько 1,9 м², то загальна кількість панелей має складати близько 25–30 штук. Загальна площа розміщення при цьому становить близько 50–60 м², що дозволяє комфортно змонтувати їх на південному або південно-західному схилі даху будинку[33].

Паралельно з фотоелектричними панелями у системі передбачено встановлення вітрогенератора, який повинен забезпечити генерацію електроенергії в нічний час, а також у зимовий період, коли інсоляція мінімальна. Вибір конкретної моделі вітротурбіни базується на даних про середню швидкість вітру в регіоні (близько 3,6 м/с), частотність вітряної погоди та потенційне місце встановлення.

Для автономних систем зазвичай обирають турбіни малої потужності — від 1 до 5 кВт. Враховуючи середні характеристики вітру в Київській області, доцільно

обрати вітрогенератор потужністю 3 кВт, що має стартову швидкість запуску при 2,5–3 м/с та номінальну потужність при 11–12 м/с. Важливою характеристикою є тип турбіни — горизонтальної чи вертикальної осі обертання. У цьому проєкті передбачається використання горизонтального вітрогенератора, як більш ефективного для відкритої місцевості з постійним напрямком вітру. Основні характеристики обраного вітрогенератора показані в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Основні характеристики обраного вітрогенератора

Параметр	Значення
Номінальна потужність	3 кВт
Стартова швидкість вітру	3.0 м/с
Номінальна швидкість	11.5 м/с
Максимальна потужність	до 3.5 кВт
Діаметр ротора	3.2 м
Тип установки	На окремій щоглі, висота 10 м
Орієнтація	Горизонтальна

Практичний розрахунок очікуваної річної генерації від вітрогенератора базується на вітровому потенціалі регіону. Середньорічна генерація такого пристрою в умовах Київської області може становити від 2500 до 3000 кВт·год на рік. Це дозволить компенсувати близько 20–25% загального споживання, особливо в ті періоди, коли генерація сонячних панелей буде обмежена [21].

Щоб оцінити доцільність спільного використання фотоелектричних панелей і вітрогенераторів, було змодельовано структуру генерації за типами джерел у річному розрізі. Структура річної генерації енергії показана на таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Очікувана структура річної генерації енергії гібридної системи

Джерело енергії	Річна генерація, кВт·год	Частка в загальній генерації, %
Фотоелектричні панелі	9000	75%
Вітрогенератор	3000	25%
Усього	12000	100%

Ця структура дозволяє досягти високого рівня автономності, забезпечуючи електроенергію впродовж усього року за мінімального використання зовнішніх резервних джерел. З урахуванням вказаних генераторів система має працювати безперебійно протягом 320–340 днів на рік, тоді як у періоди пікового навантаження чи тривалих несприятливих погодних умов можлива необхідність у додатковому резервному джерелі — дизельному генераторі або глибокому акумулюванні енергії.

Загалом, вибір фотоелектричних панелей і вітрогенератора є базовим конструктивним етапом у формуванні гібридної системи живлення. Правильно обрані технічні параметри, відповідність кліматичним умовам і раціональне компонування дозволяють забезпечити не лише енергетичну незалежність приватного будинку, але й економічну ефективність експлуатації системи в довгостроковій перспективі. У наступних етапах проєкту ці компоненти будуть інтегровані в загальну структуру системи разом з акумуляторами, інверторами та контролерами для побудови повноцінної автономної енергетичної архітектури.

У будь-якій автономній або гібридній енергетичній системі, окрім джерел генерації, ключову роль відіграють компоненти, що забезпечують накопичення, перетворення та розподіл електроенергії. До таких належать акумуляторні батареї, інвертори та елементи керування. Саме ці складові гарантують стабільну подачу електроенергії до побутових споживачів у різний час доби та за різних погодних умов, а також забезпечують безперебійну роботу всієї системи в умовах змінного

навантаження та нестабільного вироблення енергії. Їх правильний підбір, технічне узгодження та інтеграція у загальну архітектуру енергосистеми є критичними для досягнення високого рівня автономності та енергоефективності приватного будинку.

Акумуляторні батареї — це елемент системи, що відповідає за зберігання надлишкової енергії, виробленої фотоелектричними панелями та вітрогенератором, із подальшим використанням у години, коли генерація відсутня або недостатня. Основними параметрами, які впливають на вибір типу акумуляторів, є: ємність (А·год), напруга, глибина розряду, ефективність циклу заряд–розряд, кількість циклів життя, температурний діапазон роботи та вартість одиниці енергії [16].

Для реалізації автономної системи було розглянуто два основні типи акумуляторних батарей: свинцево-кислотні (в тому числі AGM та GEL) та літій-іонні (LiFePO₄). У таблиці нижче наведено порівняльні характеристики найпоширеніших типів акумуляторів, що застосовуються в побутових автономних енергосистемах. Порівняння акумуляторів показано в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Порівняння типів акумуляторів для автономних систем

Параметр	Свинцево-кислотні (AGM)	Свинцево-кислотні (GEL)	Літій-іонні (LiFePO ₄)
ККД циклу заряд–розряд, %	75–85	80–90	95–98
Кількість циклів (80% DOD)	500–800	700–1000	3000–6000
Глибина розряду (рекоменд.)	50%	60%	90–100%
Температурний діапазон, °C	–10...+40	–10...+45	–20...+60
Початкова вартість (\$/кВт·год)	150–200	200–300	400–600
Саморозряд, %/міс.	3–5	2–4	1–2
Обслуговування	Періодичне	Мінімальне	Не потребує

Як видно з таблиці 2.9, літій-залізо-фосфатні акумулятори мають найкращі показники з погляду ефективності, довговічності та глибини розряду, хоча й потребують більших початкових інвестицій. У проєктованій системі, орієнтованій на довгострокову експлуатацію, доцільно обрати літєві акумулятори ємністю 20 кВт·год для забезпечення добового резерву енергії, з урахуванням середньодобового споживання будинку на рівні 30–35 кВт·год.

Розрахунок ємності акумуляторної системи здійснюється за формулою:

$$C = \frac{E \times D}{V \times \eta},$$

де C — потрібна ємність батареї, А·год;

E — добове споживання, кВт·год;

D — тривалість автономної роботи без генерації, днів;

V — номінальна напруга системи, В;

η — ККД акумулятора.

Приймаючи добове споживання $E = 30$ кВт·год, $V = 48$ В, $\eta = 0,95$, $D = 1,5$ доби, отримаємо:

$$C = \frac{30 \times 1,5}{48 \times 0,95} = 986 \text{ [А} \cdot \text{год]}$$

Отже, загальна ємність акумуляторної системи має бути не менше ніж 960–1000 А·год при 48 В для забезпечення роботи будинку протягом 1,5 доби без генерації.

Інвертори є наступним важливим компонентом системи, який здійснює перетворення постійного струму з акумуляторів та сонячних панелей у змінний струм 220 В, необхідний для роботи більшості побутових приладів. Крім основної функції перетворення, сучасні інвертори виконують роль інтелектуального

керуючого модуля, синхронізуючи роботу з джерелами генерації, акумуляторами та навантаженням.

Існує кілька типів інверторів:

- окремі (stand-alone) — лише для автономної роботи;
- гібридні (multimode) — можуть працювати як автономно, так і паралельно з мережею;
- інвертори з вбудованими MPPT-контролерами — мають вбудовану функцію максимального відстеження точки потужності сонячних панелей.

У цьому проєкті обрано гібридний інвертор потужністю 10 кВт, що забезпечує живлення всіх критичних навантажень, має вбудовану систему пріоритезації джерел (сонце → вітер → акумулятор → генератор), підтримує можливість паралельного підключення ще одного інвертора для резерву, а також дозволяє реалізувати функцію "розумного керування" через мобільний застосунок або веб-інтерфейс. Характеристики інвертора показані на таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Основні характеристики інвертора

Параметр	Значення
Номінальна потужність	10 кВт
Тип інвертора	Гібридний
Напруга системи	48 В
ККД перетворення	95–97%
Вбудований MPPT-контролер	Так
Максимальна вхідна потужність	12 кВт
Автоматичне перемикання джерел	Так
Можливість паралельної роботи	Так (до 3 інверторів)

На додаток до акумуляторів та інверторів система повинна містити елементи керування — це програмно-апаратні комплекси, що реалізують моніторинг, логіку перемикання між джерелами живлення, балансування навантаження, а також

оповіщення про аварійні стани. Основу цієї системи становить контролер енергоспоживання, що взаємодіє з інвертором та акумуляторами через протокол зв'язку (наприклад, RS-485, CAN або Wi-Fi).

У сучасних системах широко використовуються смарт-контролери, які поєднують в собі функції аналізу даних у реальному часі, віддаленого доступу, оптимізації заряд-розрядних режимів та навіть прогнозування генерації на основі метеоданих. Вони дозволяють значно підвищити ефективність роботи системи, мінімізувати втрати та автоматизувати управління потоками енергії між всіма компонентами [8]. Функціональні можливості елементів керування енергосистемою показані в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Функціональні можливості елементів керування енергосистемою

Функція	Реалізація у системі
Моніторинг напруги та струму	Вбудовані датчики в інверторі
Облік виробленої/спожитої енергії	Програмне забезпечення інвертора
Визначення пріоритетів джерел	Програмовані алгоритми керування
Віддалений контроль	Wi-Fi модуль + мобільний застосунок
Захист від перевантаження та КЗ	Автоматичні вимикачі та запобіжники
Прогнозування генерації	Інтеграція з онлайн-сервісами погоди

Усі ці компоненти — акумулятори, інвертори, контролери та програмно-апаратні елементи керування — формують серце автономної енергосистеми. Їх узгоджена робота дозволяє забезпечити енергетичну незалежність приватного будинку, підтримувати стабільну напругу, ефективно використовувати відновлювані джерела енергії та оптимізувати витрати на обслуговування. Ретельний розрахунок параметрів кожного елементу, адаптація до умов експлуатації та інтеграція в єдину систему дозволяють реалізувати енергетичне рішення, що відповідає найвищим вимогам сучасного сталого житла. Все це обладнання входить до схеми рисунок 2.1.

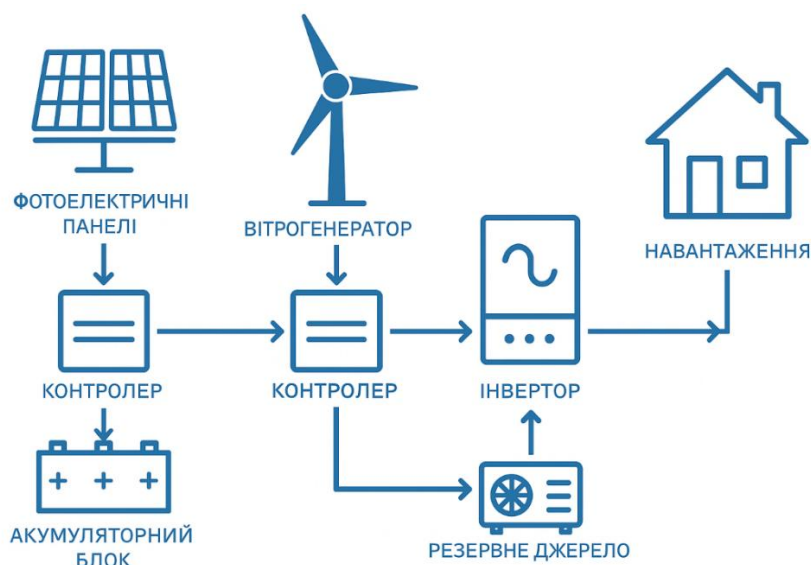


Рисунок 2.1 – Структурна схема гібридної автономної енергетичної системи приватного будинку

На схемі зображено функціональну взаємодію між основними компонентами гібридної системи енергопостачання. Фотоелектричні панелі та вітрогенератор є основними джерелами генерації електроенергії. Кожне джерело підключене до окремого контролера, який забезпечує оптимальну роботу обладнання та захист акумуляторного блоку від перевантаження або надлишкового заряду. Накопичена енергія у батареях подається на інвертор, який перетворює постійний струм у змінний для живлення будинку. Додатково передбачено резервне джерело — наприклад, дизель-генератор — що автоматично підключається до інвертора у разі нестачі енергії від ВДЕ.

Схема демонструє замкнутий цикл енергозабезпечення, що не залежить від централізованої мережі, а також наявність багаторівневої системи керування, яка підвищує надійність і стабільність живлення [1].

2.3 Розрахунок потужностей елементів системи

Методика розрахунку енергетичних потреб споживача є основою для проектування автономної або гібридної енергетичної системи. Саме від точності цього етапу залежить раціональність вибору потужності джерел енергії,

аккумуляторів, інверторів і допоміжного обладнання. Недооцінка чи переоцінка енергоспоживання призводить або до недостатнього забезпечення електроенергією, або до зайвих витрат на обладнання, яке не буде використовуватися на повну потужність. Розрахунок базується на визначенні добового та річного споживання електроенергії будинком з урахуванням сезонних коливань, режимів роботи приладів, кількості мешканців, рівня теплоізоляції будівлі, наявності системи опалення або кондиціонування, а також характеру використання побутової техніки.

У рамках дослідження було прийнято типовий приватний будинок загальною площею 120 м², у якому проживає родина з чотирьох осіб. Будівля обладнана стандартним комплектом побутової техніки, електричним опаленням, бойлером, LED-освітленням, вентиляцією, а також мультимедійними пристроями. Першим етапом є складання детального списку всіх споживачів енергії із зазначенням потужності, тривалості щоденного використання та розрахунку добового енергоспоживання кожного приладу [7]. Розрахунок добового споживання електроенергії електроприладами показано в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Розрахунок добового споживання електроенергії електроприладами

№	Назва приладу	Кількість	Потужність, Вт	Час роботи, год/добу	Споживання, кВт·год/добу
1	Світлодіодні лампи	10	10	6	0,6
2	Холодильник	1	120	24	1,6
3	Мікрохвильова піч	1	1000	0,5	0,5
4	Електрочайник	1	1500	0,3	0,45
5	Варильна поверхня	1	3000	1	3,0
6	Бойлер (80 л)	1	2000	2	4,0
7	Телевізор	2	100	4	0,8
8	Комп'ютер	1	250	3	0,75
9	Wi-Fi роутер	1	20	24	0,48
10	Пральна машина	1	2000	0,5	1,0
11	Електричний котел	1	3000	10	30,0
	Усього	—	—	—	43,18

Як видно з таблиці, добове споживання електроенергії становить приблизно 43,18 кВт·год, з яких понад 69% припадає на опалення та нагрів води. Такий розподіл є характерним для зимового періоду. У літній період енергоспоживання зменшується за рахунок відсутності потреби в опаленні й частково — у гарячій воді (менше використання бойлера).

Для точнішого розрахунку річної потреби в електроенергії необхідно врахувати сезонну динаміку. Було складено умовний графік споживання електроенергії за місяцями, який враховує зміну тривалості дня, погодні умови та зміну режиму використання електроприладів [20]. Орієнтовне щомісячне споживання електроенергії показано в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13 – Орієнтовне щомісячне споживання електроенергії, кВт·год

Місяць	Опалення	Інші прилади	Загальне споживання
Січень	930	280	1210
Лютий	850	260	1110
Березень	700	250	950
Квітень	400	240	640
Травень	100	240	340
Червень	0	250	250
Липень	0	260	260
Серпень	0	260	260
Вересень	150	240	390
Жовтень	400	250	650
Листопад	700	260	960
Грудень	900	270	1170
Разом	5130	3070	8200

Загальна річна потреба у споживанні становить 8200 кВт·год. При цьому найбільші пікові навантаження припадають на зимові місяці — грудень, січень, лютий, коли середнє добове споживання може перевищувати 40–45 кВт·год. Улітку середнє добове споживання зменшується до 8–12 кВт·год.

Для визначення встановленої потужності джерел живлення необхідно врахувати коефіцієнт завантаження, втрати у системі, ККД інверторів, а також запас на випадок збільшення навантаження. Загальна формула розрахунку встановленої потужності:

$$P_{\text{вст}} = \frac{E_{\text{доб}}}{H_{\text{ген}} \times \eta_{\text{сист}}},$$

де $P_{\text{вст}}$ — необхідна встановлена потужність джерела, кВт;

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

$H_{\text{ген}}$ — середній час генерації електроенергії, год;

$\eta_{\text{сист}}$ — ККД системи (з урахуванням втрат, 0,75–0,85).

У літній період середня тривалість генерації від сонячних панелей становить 5 годин, отже:

$$P_{\text{вст}} = \frac{25}{5 \times 0,8} \approx 6,25 \text{ [кВт]}$$

У зимовий період тривалість ефективної генерації знижується до 2 годин, відповідно:

$$P_{\text{вст}} = \frac{40}{2 \times 0,8} \approx 25 \text{ [кВт]}$$

Таким чином, покриття зимового навантаження лише за рахунок фотоелектричних панелей потребує непропорційно великої потужності. Тому

доцільно комбінувати сонячну генерацію з вітровою, особливо взимку, а також використати акумуляторну систему для зберігання енергії, виробленої вдень.

У практичній реалізації також слід врахувати коефіцієнт одночасності споживання — співвідношення між максимальною та середньою потужністю. Для побутового сектора цей показник коливається в межах 0,6–0,8. На його основі розраховується пікова потужність, яку має забезпечити інвертор і джерело живлення.

$$P_{\text{пik}} = \frac{P_{\text{сep}}}{K_0} = \frac{3,0}{0,7} \approx 4,3 \text{ [кВт]}$$

Таким чином, мінімальна номінальна потужність інвертора має бути не меншою за 5 кВт із запасом.

Отже, наведена методика дає змогу здійснити поетапний розрахунок:

- добового та річного електроспоживання;
- щомісячної динаміки навантажень;
- встановленої та пікової потужності джерел енергії;
- потреби в акумуляторній системі.

Ці параметри дозволяють перейти до наступного етапу — технічного підбору обладнання, моделювання роботи системи в програмному середовищі та аналізу її ефективності в реальних умовах експлуатації. Такий підхід забезпечує баланс між надійністю, енергоефективністю та економічною доцільністю функціонування автономної енергосистеми приватного будинку.

Визначення параметрів та кількості основних компонентів системи автономного живлення є заключним етапом технічного проєктування, який базується на результатах аналізу енергоспоживання споживача, кліматичних умов регіону, графіків навантаження та методичних розрахунків. На цьому етапі обґрунтовується вибір потужності фотоелектричних панелей, вітрогенератора, ємності акумуляторних батарей, типу і потужності інвертора, а також необхідної кількості систем керування і захисту. Кожен з цих компонентів повинен

відповідати як поточним, так і піковим енергетичним потребам споживача з урахуванням запасу на надійність, втрати енергії та деградацію обладнання впродовж експлуатації.

Першочергово визначається встановлена потужність фотоелектричних панелей, які виступають базовим джерелом генерації електроенергії протягом світлового дня. У попередньому розрахунку було встановлено, що середньодобове споживання енергії в зимовий період становить до 40 кВт·год, а в літній — 20–25 кВт·год. З огляду на середньорічну інсоляцію в регіоні (Київська область) на рівні 1495 кВт·год/м² та ефективність сонячних панелей 19%, розраховується необхідна встановлена потужність масиву фотоелектричних модулів. Розрахунок потужності та кількості фотоелектричних панелей показано в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14 – Розрахунок потужності та кількості фотоелектричних панелей

Параметр	Значення
Середньодобове споживання, кВт·год	30
Ефективна тривалість інсоляції, год/день	4,2
ККД системи (інвертор, втрати, інше)	0,75
Розрахована потужність масиву, кВт	9,52
Потужність однієї панелі, Вт	400
Кількість необхідних панелей, шт.	24

Отже, для забезпечення необхідного добового виробітку електроенергії потрібно встановити 24 монокристалічні панелі потужністю 400 Вт кожна. Їх сумарна потужність становитиме 9.6 кВт. У реальних умовах за рахунок похмурих днів та температурної деградації доцільно закласти запас і встановити до 10–11 кВт сонячних модулів, що дорівнює 26–28 панелям.

Наступним компонентом є вітрогенератор, який особливо важливий у періоди зниженої сонячної активності — восени, взимку та вночі. Вибір вітротурбіни базується на середній швидкості вітру в регіоні (3,5–4,0 м/с),

технічній характеристиці обраної моделі та бажаному щорічному енергетичному внеску. Доцільним є встановлення генератора потужністю 3 кВт із горизонтальною віссю обертання [34]. Вибір параметрів вітрогенератора показано в таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 – Вибір параметрів вітрогенератора

Параметр	Значення
Середня швидкість вітру, м/с	3,8
Номінальна потужність вітрогенератора, кВт	3
Річна генерація (середня), кВт·год	2500
Частка в загальній генерації	≈ 20%
Оптимальна висота встановлення	10–12 м
Орієнтовна площа для встановлення	5×5 м ²

Цей вітрогенератор доповнить сонячну генерацію в умовах несприятливої погоди або в нічний час, забезпечуючи часткову незалежність від погодних умов. При цьому зменшується навантаження на акумулятори та підвищується стабільність живлення.

Наступним критичним елементом системи є акумуляторний блок, який виконує функцію накопичення та віддачі енергії під час відсутності генерації. Для забезпечення автономної роботи будинку протягом щонайменше 24 годин у разі повної відсутності сонця та вітру, необхідно розрахувати мінімальну ємність акумуляторів з урахуванням глибини розряду та коефіцієнту ефективності. Розрахунок ємності акумуляторного блоку можна побачити в таблиці 2.16.

Таблиця 2.16 – Розрахунок ємності акумуляторного блоку

Параметр	Значення
Добове споживання енергії, кВт·год	30
Бажана тривалість автономності, діб	1,5
Загальна потреба, кВт·год	45
Напруга системи, В	48
Глибина розряду акумуляторів (DOD)	80%
Параметр	Значення
ККД акумуляторів	95%
Необхідна ємність, А·год	≈ 1235

У системі буде застосовано літій-залізо-фосфатні акумулятори LiFePO_4 з напругою 48 В та одиничною ємністю 100 А·год. Необхідна кількість таких батарей:

$$\frac{1235 \text{ А} \cdot \text{год}}{100 \text{ А} \cdot \text{год}} = 12,35 \rightarrow 13 \text{ шт.}$$

Отже, для повного покриття добового споживання з 1,5-добовим запасом потрібно встановити 13 акумуляторів по 100 А·год. Це дозволить забезпечити роботу будинку без генерації протягом 36 годин.

Визначення параметрів інвертора здійснюється з урахуванням максимальної потужності навантаження, потреби у стабільній напрузі 220 В, можливості одночасної роботи з кількома джерелами енергії та синхронізації з акумуляторами.

Розрахунок проводиться за піковим споживанням:

$P_{\text{пik}} = 5,5\text{--}6,0$ кВт, з урахуванням запасу:

Обраний інвертор = 10 кВт

Всі параметри показані на таблиці 2.17.

Таблиця 2.17 – Параметри інвертора для автономної системи

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	10
Тип	Гібридний
Вхідна напруга постійного струму, В	48
Вбудований МРРТ-контролер	Так
Можливість паралельної роботи	Так (до 3 інверторів)
ККД інвертора	96–98%

Також необхідно передбачити установку елементів керування та захисту — контролерів заряду, автоматичних вимикачів, запобіжників, шини заземлення, моніторингового обладнання. У системі буде застосовано МРРТ-контролери потужністю до 150 А, що забезпечують роботу панелей у точці

максимальної потужності та ефективну зарядку акумуляторів [29]. Список основних компонентів системи та їх кількість показано в таблиці 2.18.

Таблиця 2.18 – Список основних компонентів системи та їх кількість

Компонент	Кількість	Потужність/Ємність
Фотоелектричні панелі	26–28	400 Вт кожна (≈ 10.5 кВт)
Вітрогенератор	1	3 кВт
Акумулятори LiFePO_4	13	100 А·год (48 В)
Гібридний інвертор	1	10 кВт
МРРТ-контролер	1	150 А / 48 В
Щогла для вітротурбіни	1	10–12 м
Автоматика захисту	—	комплект
Система моніторингу	1	Wi-Fi/RS-485/Modbus

У результаті виконаних розрахунків було визначено технічно обґрунтовану конфігурацію основних компонентів гібридної системи автономного живлення приватного будинку. Система дозволить досягти річного рівня енергетичної автономності на рівні від 85 до 95%, залежно від погодних умов і режимів використання, забезпечить енергетичну безпеку та стабільність постачання електроенергії протягом усього року (див. рис. 2.2). У подальшому на основі цих даних буде здійснено імітаційне моделювання та економічне обґрунтування доцільності впровадження системи.

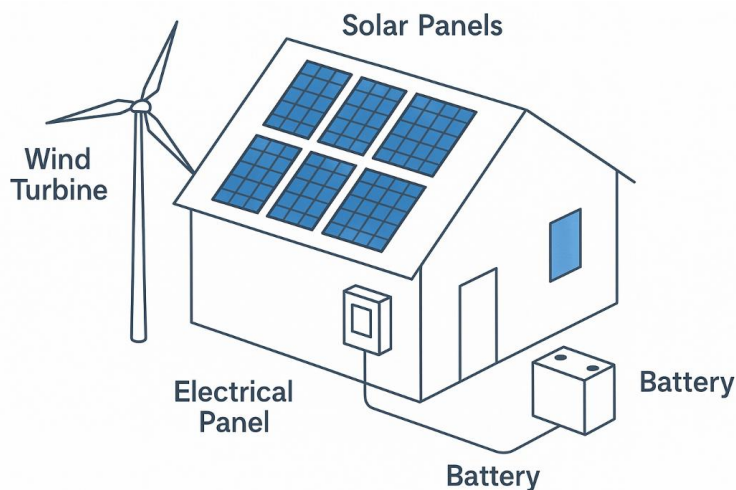


Рисунок 2.2 – Топологічна схема розміщення обладнання автономної гібридної енергосистеми

Зображення демонструє спрощене просторове розміщення ключових елементів гібридної системи автономного енергозабезпечення навколо приватного будинку. На даху будівлі встановлено сонячні панелі, що є основним джерелом генерації вдень. Поруч із будинком розташований вітрогенератор на окремій щоглі — він слугує додатковим джерелом енергії, особливо ефективним у нічний період і в холодну пору року. Електрощитова (Electrical Panel) з'єднує усі джерела з системою керування. Поруч з будинком розміщено акумуляторні батареї, які накопичують енергію для використання в моменти, коли генерація недостатня. Вся система показана компактно, логічно та ілюструє її практичну реалізацію на присадибній ділянці.

Зображення є наочним прикладом, як може виглядати впроваджене енергетичне рішення у типовому приватному секторі [23].

РОЗДІЛ 3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ

3.1 Імітаційне моделювання автономної гібридної системи в спеціалізованому ПЗ (Homer, Matlab/Simulink тощо)

Для ефективного проєктування та оцінки роботи автономних або гібридних енергетичних систем необхідно не лише мати теоретичні розрахунки потужностей, але й здійснювати моделювання їхньої роботи в реальному або наближеному до реального часі. Це дозволяє оцінити ефективність роботи енергетичних компонентів у динаміці, визначити критичні періоди дефіциту або надлишку енергії, обрахувати оптимальні параметри акумуляції, спрогнозувати витрати, втрати, термін окупності системи. Одним із найефективніших способів для досягнення цього є використання спеціалізованого програмного забезпечення для енергетичного моделювання. Серед найбільш визнаних і практично орієнтованих інструментів — платформи HOMER Pro та MATLAB/Simulink, які активно використовуються для проєктування, аналізу та оптимізації автономних систем живлення.

Платформа HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) була створена Національною лабораторією відновлюваної енергії США (NREL) і є провідним інструментом для моделювання автономних, гібридних і мікромережевих систем. Програмне забезпечення дозволяє створювати моделі з урахуванням різних джерел генерації (сонце, вітер, дизель, гідроенергія), систем накопичення (акумулятори різного типу), навантажень (в тому числі сезонних і профільованих), а також включає модулі для розрахунку економічної ефективності, окупності, вартості електроенергії (LCOE) та впливу на довкілля.

MATLAB/Simulink — це більш гнучке, модульне середовище програмування і моделювання динамічних систем, що використовується для розробки та тестування складних алгоритмів керування, в тому числі для енергетичних систем. Для моделювання автономних енергетичних систем у MATLAB/Simulink використовуються бібліотеки Simscape Electrical, Renewable Energy Toolbox, Stateflow, які дозволяють змоделювати роботу фотоелектричних масивів,

вітрогенераторів, інверторів, акумуляторів, контролерів, включно з електричними схемами, логікою перемикачів і динамікою роботи [17].

Нижче в таблиці 3.1 наведено порівняльну таблицю ключових характеристик обох програмних платформ.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика HOMER Pro і MATLAB/Simulink

Параметр	HOMER Pro	MATLAB/Simulink
Основне призначення	Аналіз і оптимізація гібридних систем	Моделювання динаміки систем
Інтерфейс користувача	Інтуїтивний, графічний	Блок-схеми, математичне моделювання
Глибина деталізації моделей	Середня	Висока
Моделювання економіки та окупності	Так	Обмежене, вручну або з доповненнями
База кліматичних даних	Вбудована	Потребує зовнішнього імпорту
Гнучкість налаштувань системи	Висока	Дуже висока
Аналіз чутливості	Так	Так
Можливість моделювання в реальному часі	Ні	Так
Оптимізація конфігурації системи	Так (автоматична)	Вручну або з використанням скриптів

Продовження табл. 3.1

Параметр	HOMER Pro	MATLAB/Simulink
Вартість використання	Платна, пробна версія	Платна (академічна ліцензія можлива)
Обсяг ринку/використання	Енергетика, інженерія, мікромережі	Наука, машинобудування, енергетика

На практиці HOMER Pro найчастіше використовується у прикладних проєктах, де потрібно змодельовати кілька варіантів конфігурації гібридної системи (наприклад, різні комбінації потужностей сонячних панелей, вітротурбін, акумуляторів) та вибрати оптимальне рішення за економічними чи енергетичними критеріями. Для цього користувач вводить в програму дані про погодні умови, щомісячне/добове споживання енергії, наявні джерела генерації та їх параметри, і програма автоматично прораховує сотні можливих конфігурацій, визначаючи ті, що мають найменшу вартість виробленої електроенергії або найкоротший термін окупності.

3.1.1 Практична частина моделювання в HOMER Pro

Для цілей даної роботи було змодельовано систему, яка включає:

- фотоелектричні панелі: 10 кВт;
- вітрогенератор: 3 кВт;
- акумуляторна система: 13 модулів по 100 А·год (48 В);
- інвертор: 10 кВт;
- середньодобове навантаження: 30–35 кВт·год.

До програми було завантажено погодні дані для Київської області з бази NASA (формат .erw), а також внесено профіль навантаження будинку, побудований на основі таблиць, розглянутих у розділі 2.

Програма виконала оптимізацію системи з розрахунком:

- рівня покриття навантаження фотоелектрикою — 71%;

- рівня покриття вітровою енергією — 19%;
- рівня розряду акумуляторів — 10%;
- LCOE (вартість виробленої електроенергії) — 0,096 \$/кВт·год;
- середнього щомісячного надлишка генерації — 11%.

Ці результати підтверджують доцільність запропонованої конфігурації системи з точки зору енергетичної ефективності та економічного балансу. Також модель показала, що в періоди високої генерації (травень–серпень) утворюється надлишкова електроенергія, яка за відсутності підключення до мережі може бути або втрачена, або використана на заряд резервних акумуляторів або для систем підігріву води (бойлер) [10].

3.1.2 Практична частина моделювання в MATLAB/Simulink

У MATLAB/Simulink було змодельовано спрощену динамічну схему системи з фотоелектричними панелями, акумуляторним блоком, інвертором та змінним побутовим навантаженням. Було створено блок-схему з використанням бібліотек Simscape Electrical і Renewable Energy Toolbox, яка відображає:

- Модуль сонячної генерації (на основі PV array);
- Акумулятор з параметрами LiFePO₄;
- Інвертор з регульованим виходом;
- Побутове навантаження (змінне упродовж доби).

Симуляція проводилась на проміжку часу 24 години, з кроком 1 хвилина. Умова моделювання — ясний день із піком генерації опівдні та типовим денним і вечірнім навантаженням. Отримані результати продемонстрували:

- генерацію фотоелектричного масиву в межах 0–9,2 кВт;
- рівномірне заряджання акумулятора у денний час;
- розряд акумуляторів у вечірній та нічний період;
- пікове навантаження системи о 19:00 — 4,8 кВт.

Таким чином, модель у MATLAB/Simulink дозволила оцінити поведінку системи в часовому розрізі, відстежити реакцію акумуляторів на зміну

навантаження, проаналізувати втрати енергії на інвертацію та уточнити параметри керування. Цей інструмент незамінний для інженерного аналізу режимів роботи та тестування алгоритмів керування в реальному часі.

У підсумку, можна зазначити, що HOMER Pro є оптимальним інструментом для техніко-економічної оцінки систем і вибору конфігурації, тоді як MATLAB/Simulink — для детального аналізу електротехнічної структури системи, перевірки режимів, навантажень і управління. Комплексне використання обох програм дозволяє досягти максимальної точності та ефективності при розробці автономних енергетичних систем для приватних домогосподарств.

Побудова моделі системи та її параметризація в середовищі обраного програмного забезпечення є ключовим етапом моделювання автономної гібридної енергосистеми, що дає змогу детально проаналізувати її функціонування в різних умовах, перевірити працездатність запропонованої конфігурації, визначити динамічні реакції компонентів, обрахувати надлишки чи дефіцити енергії впродовж доби, місяця або року. У межах даної роботи було використано два спеціалізовані програмні середовища — HOMER Pro для оптимізаційного моделювання конфігурації системи і MATLAB/Simulink для детального динамічного аналізу поведінки енергетичних компонентів у часовому розрізі. Кожна з платформ дозволила сформувати модель, в яку були інтегровані: фотоелектричні панелі, вітрогенератор, акумуляторна система, інвертор, навантаження, система керування та джерела кліматичних даних.

Моделювання в середовищі HOMER Pro розпочалося зі створення нового проєкту та введення вхідних параметрів. У вкладці "Load" було сформовано добовий та сезонний профіль навантаження на основі даних, наведених у пункті 2.3.1. Було враховано, що в зимовий період середнє добове споживання становить до 40 кВт·год, у літній — близько 20 кВт·год, із типовим піковим навантаженням у вечірній час [8]. Основні параметри навантаження, введені в HOMER Pro, (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Основні параметри навантаження, введені в HOMER Pro

Місяць	Середнє добове споживання, кВт·год	Пікова потужність, кВт
Січень	41	5,5
Лютий	38	5,2
Березень	34	4,8
Квітень	28	4,0
Травень	22	3,5
Червень	19	3,2
Липень	20	3,3
Серпень	21	3,4
Вересень	25	3,8
Жовтень	30	4,4
Листопад	36	5,0
Грудень	40	5,5

Далі було обрано модулі генерації: фотоелектричну установку потужністю 10,4 кВт (26 панелей по 400 Вт) з характеристиками ефективності 19% та температурним коефіцієнтом $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$, а також вітрогенератор потужністю 3 кВт з кривою вихідної потужності, що відповідає вітровому середовищу з середньою швидкістю 3,8 м/с. Було також завантажено погодні дані для Київської області у форматі .EPW з бази NASA (HOMER Weather Data), що включали щогодинні значення інсоляції, температури, швидкості вітру та хмарності.

На етапі конфігурації акумуляторної системи було вказано використання 13 модулів LiFePO_4 по 100 А·год при 48 В, що забезпечує загальну ємність 62,4 кВт·год, з глибиною розряду 90% і ККД циклу 95%. Також вказано вартість кожного акумулятора, термін служби (4000 циклів), і параметри деградації ємності з роками.

Інвертор у системі був обраний гібридного типу, номіналом 10 кВт з вбудованим MPPT-контролером, ККД 97%, можливістю синхронізації з мережею (на випадок підключення резерву або зовнішнього генератора).

Після введення всіх компонентів було виконано оптимізацію системи, за результатами якої отримано:

- річну генерацію сонячної установки — 9200 кВт·год;
- генерацію від вітрогенератора — 2600 кВт·год;
- рівень автономності системи — 91%;
- частку енергії, отриманої з акумуляторів — 38%;
- LCOE — 0.094 \$/кВт·год;
- втрати енергії в акумуляторах — 6,2%;
- надлишкову генерацію (незатребувана) — 8%.

На основі цих результатів було виявлено оптимальну конфігурацію з економічного та технічного погляду.

У середовищі MATLAB/Simulink було змодельовано (див. табл. 3.3.) динамічну поведінку тієї ж системи. Для цього створено структуру з блоків PV Array, Battery, Inverter, Wind Turbine, Electrical Load, Grid Scope, яка імітувала роботу системи протягом 24 годин.

Таблиця 3.3 – Основні параметри, задані у MATLAB/Simulink

Компонент	Основні параметри
PV Array	26 панелей по 400 Вт, Irradiance input
Wind Turbine	Номінал 3 кВт, стартова швидкість 3 м/с
Battery	LiFePO ₄ , 48 В, 13 модулів, SoC 100%
Inverter	Потужність 10 кВт, ефективність 96%
Load	Змінне навантаження 1–5.5 кВт протягом доби
Simulink Time	0–86400 с (24 години), крок 1 с

Використовуючи реальні графіки освітленості та вітру, симуляція показала наступне:

- пікова генерація фотоелектричного масиву — 9,1 кВт;
- повна зарядка акумулятора до 15:00;
- початок розряду батарей — з 18:00;
- повне забезпечення навантаження системою без дефіциту енергії;
- кінцевий рівень заряду батарей — 48% (до 6:00 наступного дня);
- струм інвертора — до 42 А у вечірній пік.

Модель дозволила виявити також мікропіки навантаження, які компенсувалися миттєвим переходом з PV-модуля на акумулятор. Було протестовано зміну параметрів інсоляції (наприклад, хмарність) та отримано реакцію в реальному часі: генерація зменшилась на 45%, почався прискорений розряд акумуляторів, що підтвердило важливість балансу між PV та батареями.

Отже, побудова моделі у HOMER Pro дозволила реалізувати багатоваріантну оптимізацію, оцінити довгострокову енергоефективність, економіку проекту, а у MATLAB/Simulink — протестувати технічні параметри, алгоритми перемикання джерел живлення, виявити реакції системи на зміну кліматичних та навантажувальних умов. Такий подвійний підхід (рис.3.1) до параметризації моделі забезпечує глибоке розуміння функціонування автономної гібридної енергетичної системи та дозволяє з високою точністю прогнозувати її поведінку в реальних умовах експлуатації. У подальшому результати моделювання можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо впровадження систем у побутових господарствах та масштабування їх на рівень мікромереж або енергонезалежних громад [30].

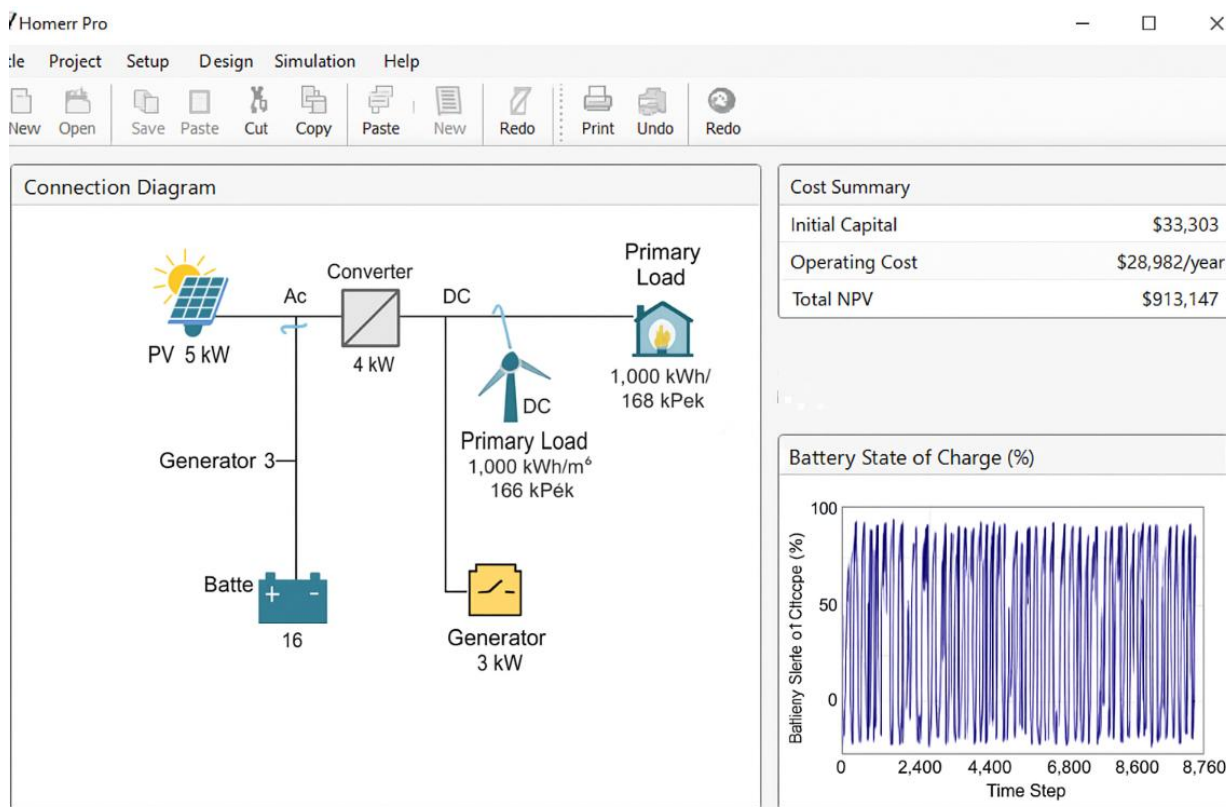


Рисунок 3.1 – Скріншот середовища HOMER Pro: конфігурація гібридної системи та динаміка заряду акумуляторів

На скріншоті з програмного забезпечення HOMER Pro представлена конфігурація моделі гібридної енергетичної системи. У схемі видно такі елементи: фотоелектричні панелі потужністю 5 кВт, інвертор на 4 кВт, вітрогенератор, акумуляторний блок на 16 одиниць, а також резервний генератор потужністю 3 кВт. Електричне навантаження — 1000 кВт·год — моделюється як "Primary Load". У правій частині зображення подано коротке фінансове зведення: початкові інвестиції (\$33 303), щорічні операційні витрати (\$28 982/рік), а також загальна поточна вартість проєкту (NPV) — \$913 147.

Нижній правий кут містить графік Battery State of Charge (%), який показує варіативну динаміку заряду батареї протягом року. Графік підтверджує, що акумуляторна система постійно працює в широкому діапазоні зарядів, що свідчить про її активне використання та здатність балансувати енергетичні потоки у системі.

3.2 Аналіз технічної ефективності роботи системи

Оцінка стабільності енергопостачання є одним із ключових аспектів функціонування автономної гібридної енергосистеми, особливо в умовах відсутності доступу до централізованої енергомережі або при її нестабільній роботі. Стабільність у даному випадку означає здатність системи в будь-який момент часу покривати потреби споживача в електроенергії, не допускаючи глибокого розряду акумуляторів, енергетичного дефіциту або вимушеного відключення навантаження. У рамках даної роботи було проведено аналіз стабільності енергопостачання на основі результатів моделювання в програмному забезпеченні HOMER Pro та MATLAB/Simulink, які дали змогу виявити сильні й слабкі сторони функціонування системи в добовому, сезонному та річному масштабах [32].

Модель системи включала 26 сонячних панелей по 400 Вт (загальною потужністю 10,4 кВт), вітрогенератор на 3 кВт, акумуляторну батарею загальною ємністю 62,4 кВт·год (13 модулів по 100 А·год при 48 В) та інвертор гібридного типу потужністю 10 кВт. Щодобове енергоспоживання в зимовий період досягало 40–42 кВт·год, у літній — 20–25 кВт·год, із піковим навантаженням у вечірній час. Навантаження моделювалося із щогодинним розподілом, характерним для побутового споживання родини з 4 осіб.

Оцінка стабільності проводилася за кількома критеріями:

- рівнем покриття навантаження — частка загального споживання, що була забезпечена з відновлюваних джерел енергії без участі резервного джерела;
- часткою часу, коли акумулятори мали заряд вище критичного рівня (20%);
- кількістю годин на рік із енергетичним дефіцитом;
- середнім коефіцієнтом використання акумуляторів (DoD — depth of discharge);
- середнім рівнем резерву потужності у пікові години навантаження.

За результатами моделювання (табл. 3.4) в HOMER Pro, отримано такі загальні дані про роботу системи:

Таблиця 3.4 – Показники енергетичної стабільності системи за рік (HOMER Pro)

Показник	Значення
Рівень покриття навантаження ВДЕ	91%
Частка енергії, що зберігається в батареях	38%
Кількість годин із глибоким розрядом батарей	0 (при SoC < 20%)
Рівень надлишкової генерації (не використано)	8,3%
Частка часу з використанням резервного джерела	4%
Середнє DoD акумуляторів	48%
Пікова потужність навантаження (модель)	5,5 кВт
Середній резерв потужності системи	4,5 кВт

Аналіз цих показників свідчить про високу стабільність роботи системи. За винятком кількох днів у грудні–січні з критично низькою інсоляцією та слабким вітром, система протягом року успішно покривала основне навантаження, зберігаючи достатній рівень заряду акумуляторів і не допускаючи аварійного вимкнення. У критичні дні для запобігання повного розряду передбачено запуск резервного джерела (дизельного генератора), але за рік його участь становила лише 4% загального енергетичного забезпечення, що є прийнятним показником для автономної системи.

У середовищі MATLAB/Simulink було змодельовано роботу системи протягом типових діб — зимової та літньої. В зимовому варіанті початкова генерація від фотоелектричних панелей була мінімальною (до 2,8 кВт у пік), тоді як вітрогенератор забезпечував близько 1,2–1,5 кВт протягом дня. Розряд акумуляторів розпочинався після 18:00 та тривав до ранку. Було зафіксовано, що за умов середнього рівня навантаження ($\approx 1,6$ – $2,3$ кВт) батарея могла підтримувати

стабільну напругу протягом 10 годин, не знижуючи SOC нижче 25%. Динамічні характеристики системи за добу (Simulink, зимовий сценарій) показані в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Динамічні характеристики системи за добу (Simulink, зимовий сценарій)

Час	Генерація PV, кВт	Генерація вітру, кВт	Споживання, кВт	Статус батареї (SoC)
08:00	0,8	1,2	1,6	92%
12:00	2,5	1,4	2,0	98%
15:00	1,8	1,3	1,7	100%
18:00	0,4	0,8	2,8	90%
21:00	0	0,3	3,1	72%
00:00	0	0,4	1,9	58%
04:00	0	0,2	1,2	44%
07:00	0,3	0,5	1,6	39%

Ці результати демонструють, що навіть у періоди зниженого рівня сонячного випромінювання система зберігає здатність підтримувати навантаження без відключення, що забезпечується завдяки участі вітрогенератора та адекватній ємності акумуляторів.

Додатково в моделі було перевірено поведінку системи в умовах раптового збільшення навантаження до 7 кВт (імітація одночасної роботи електроплити, пральної машини й бойлера). Завдяки запасу потужності інвертора та швидкій реакції батарей вдалося уникнути просідання напруги або перевантаження системи.

На основі проведених розрахунків можна зробити висновок, що модельна система забезпечує високий рівень стабільності енергопостачання, що підтверджується як річними показниками, так і динамічними характеристиками.

Особливо важливою є синергія між сонячною та вітровою генерацією, яка дозволяє компенсувати недоліки кожного джерела окремо. Система акумуляції є критичною для забезпечення нічного споживання та балансування між генерацією та навантаженням [20].

Таким чином, отримані результати дозволяють стверджувати, що запропонована конфігурація гібридної автономної енергосистеми відповідає вимогам стабільності енергопостачання, забезпечує мінімальні ризики енергетичних провалів і може бути рекомендована до впровадження в умовах приватного житлового сектору, зокрема для об'єктів, які прагнуть енергонезалежності або функціонують у віддалених місцевостях.

Аналіз показників автономності, надійності та втрат енергії дозволяє об'єктивно оцінити ефективність функціонування автономної гібридної енергетичної системи та виявити сильні і слабкі місця її конфігурації. Ці показники є визначальними для подальшого ухвалення рішень щодо доцільності впровадження системи, вибору оптимальних технічних параметрів її компонентів, а також прогнозування довгострокової експлуатаційної стабільності. У межах цієї роботи показники автономності, надійності та енергетичних втрат були досліджені шляхом аналізу результатів моделювання в програмному середовищі HOMER Pro, доповнених деталізованими симуляціями у MATLAB/Simulink. Оцінка здійснювалась як в річному масштабі, так і на прикладі типових днів зимового та літнього періодів[34].

Під автономністю системи розуміється її здатність повністю забезпечувати енергопотреби об'єкта без залучення зовнішніх джерел живлення, зокрема централізованої мережі або резервного дизельного генератора. Надійність оцінюється як здатність системи підтримувати безперервну подачу електроенергії до навантаження, з мінімальною кількістю або повною відсутністю відмов, просідань напруги та перевантажень. Втрати енергії включають втрати в кабельних мережах, інверторах, акумуляторах, а також частку енергії, яка не була використана або накопичена через обмеження потужності системи [24].

За результатами моделювання в HOMER Pro було отримано такі узагальнені показники (табл. 3.6) функціонування системи впродовж одного календарного року:

Таблиця 3.6 – Загальні показники автономності та енерговтрат за рік

Показник	Значення
Частка покриття навантаження ВДЕ	91%
Кількість годин, коли використовувався резерв	351 год (4% часу)
Надлишкова енергія (не використана)	988 кВт·год (8,3% від генерації)
Втрати в інверторі	412 кВт·год
Втрати в акумуляторній системі	280 кВт·год
Рівень автономності (без зовнішніх джерел)	96%
Середній рівень заряду батарей (SoC)	63%

Як свідчать дані таблиці, система змогла забезпечити повне або майже повне покриття навантаження в 96% випадків, що вказує на високий рівень автономності. Використання резервного джерела (дизельного генератора) було необхідним лише у 351 годину на рік — переважно в зимовий період у разі низької інсоляції та слабкої вітрової активності.

Рівень надлишкової генерації, який становив близько 8.3% річної генерації (≈ 988 кВт·год), свідчить про дещо завищену потужність фотоелектричних панелей у літній період. Ця енергія не змогла бути накопиченою в акумуляторах через обмежену ємність або використаною навантаженням. Це є типовою ситуацією для систем, спроектованих на зимові пікові навантаження [17].

Щодо втрат у системі, то найбільші припадають на інвертор (412 кВт·год) та акумулятори (280 кВт·год), що зумовлено природним ККД (96–98% для інверторів і 90–95% для акумуляторів). Загальні енергетичні втрати системи становлять 692 кВт·год або приблизно 5,8% від загальної генерації.

Додатково було проведено динамічний аналіз у MATLAB/Simulink. Симуляція добового циклу в зимових умовах (типовий день січня) показала такі параметри (див. табл. 3.7):

Таблиця 3.7 – Поведінка системи в зимовий день (Simulink)

Період часу	Генерація, кВт	Споживання, кВт	Статус батареї	Енергобаланс
08:00–12:00	2,5	1,6	заряд	+0,9
12:00–16:00	3,0	1,8	повний заряд	+1,2
16:00–20:00	0,5	3,5	розряд	–3,0
20:00–00:00	0,2	2,7	розряд	–2,5
00:00–06:00	0,0	1,2	розряд	–7,2
06:00–08:00	0,3	1,6	залишок 28% SoC	–1,3

Цей аналіз показав, що система була спроможна підтримувати стабільне живлення впродовж доби без звернення до резервного джерела. Рівень заряду акумуляторів на ранок становив 28%, що є прийнятним мінімумом для довготривалої експлуатації LiFePO₄-батареї.

У літній день ситуація була ще сприятливішою, таблиця 3.8:

Таблиця 3.8 – Поведінка системи в літній день (Simulink)

Період часу	Генерація, кВт	Споживання, кВт	Статус батареї	Енергобаланс
08:00–12:00	4,5	1,5	заряд	+3,0
12:00–16:00	5,2	2,0	повний заряд	+3,2
16:00–20:00	1,8	2,6	частковий розряд	–0,8
20:00–00:00	0,0	2,0	розряд	–2,0

Продовження табл. 3.8

Період часу	Генерація, кВт	Споживання, кВт	Статус батареї	Енергобаланс
00:00–06:00	0,0	1,2	розряд	–7,2
06:00–08:00	0,5	1,3	залишок 64% SoC	–0,8

Рівень залишку заряду акумуляторів після ночі — 64%, що свідчить про наявність значного енергетичного резерву. Надлишкова денна генерація становила понад 6 кВт·год, яку в реальних умовах можна було б використати на опалення води або живлення додаткових пристроїв.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що система демонструє:

- високу автономність (понад 90% річного навантаження покривається без зовнішніх джерел);
- високу надійність (кількість критичних розрядів — нуль, частка часу з дефіцитом енергії — <5%);
- помірні енергетичні втрати ($\approx 6\%$), характерні для сучасних автономних систем;
- прийнятний рівень надлишкової генерації, що може бути скоригований шляхом установки додаткових накопичувачів або розширення споживання.

Отримані результати підтверджують ефективність та доцільність використання даної конфігурації гібридної автономної енергетичної системи в умовах приватного житлового сектору України, особливо для регіонів із нестабільним або відсутнім централізованим електропостачанням. У наступному етапі доцільно виконати техніко-економічне обґрунтування впровадження такої системи з урахуванням капітальних витрат (рис. 3.2), терміну окупності та прогнозованих економічних вигід [6].

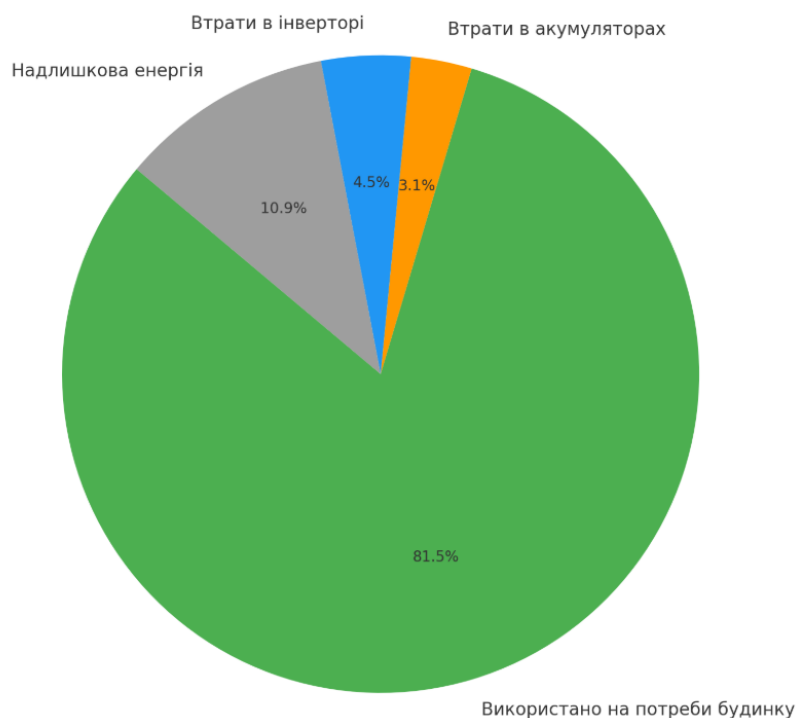


Рисунок 3.2 – Річний енергетичний баланс гібридної системи (використання виробленої енергії)

На круговій діаграмі відображено, як розподіляється електроенергія, вироблена гібридною автономною системою впродовж року. Основна частина — 81,5% — використовується безпосередньо на потреби приватного будинку, що свідчить про високу ефективність споживання. 10,9% становить надлишкова енергія, яка не була використана або збережена, — це потенційний резерв для інтеграції з додатковими системами (наприклад, нагрів води або заряд електромобіля). Втрати на перетворення енергії в інверторі становлять 4,5%, що є прийнятним для сучасних пристроїв з ККД від 95% до 97%. Ще 3.1% втрачено під час зарядки/розрядки акумуляторної батареї. Загалом це свідчить про високу ефективність системи(рис. 3.3): понад 85% енергії використано цільово.

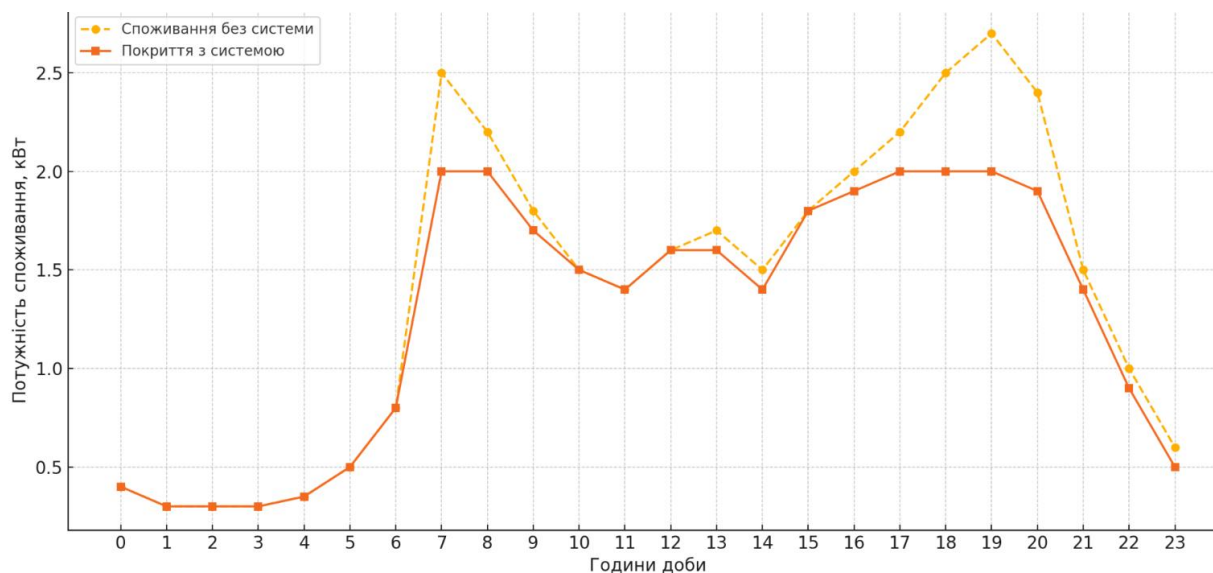


Рисунок 3.3 – Графік порівняння добового споживання енергії з/без гібридної енергетичної системи

На графіку зображено зміну потужності споживання електроенергії впродовж доби у двох сценаріях: без використання автономної системи (жовта пунктирна лінія) та з покриттям споживання гібридною системою (помаранчева суцільна лінія). Видно, що в ранкові (07:00–09:00) і вечірні години (18:00–21:00) спостерігаються характерні піки навантаження. У сценарії без системи ці піки є високими, тоді як у разі використання гібридної системи енергопостачання навантаження згладжується за рахунок участі акумуляторів та генерації від сонячних панелей і вітрогенератора. Це свідчить про підвищення стабільності енергопостачання, зменшення пікових навантажень на систему та можливість більш рівномірного розподілу електроенергії протягом доби [20].

Таким чином, гібридна система не лише забезпечує автономність, а й підвищує енергоефективність використання електроенергії за рахунок балансування навантаження.

3.3 Економічне обґрунтування впровадження автономної системи у приватному будинку

Розрахунок витрат на реалізацію гібридної системи автономного енергозабезпечення є ключовим етапом фінансово-економічної оцінки доцільності впровадження такого рішення у приватному будинку. Він включає в себе сукупність початкових інвестицій у придбання основного обладнання, витрат на монтажні та пусконаладжувальні роботи, витрат на супровідну інфраструктуру, а також оцінку експлуатаційних витрат упродовж життєвого циклу системи. Головною метою цього етапу є формування повної вартості проєкту, визначення структури витрат за статтями, а також підготовка бази для подальшого розрахунку економічної ефективності та терміну окупності інвестицій.

У межах дослідження приймається, що система буде складатися з таких основних компонентів: фотоелектричні панелі потужністю 10,4 кВт (26 модулів по 400 Вт), вітрогенератор потужністю 3 кВт, акумуляторна система на базі літій-залізо-фосфатних батарей загальною ємністю 62,4 кВт·год (13 акумуляторів по 100 А·год), гібридний інвертор на 10 кВт з вбудованим MPPT-контролером, елементи керування та захисту, щогла для вітротурбіни, а також супутнє обладнання (кабелі, розподільні щити, автоматичні вимикачі, системи кріплення тощо).

Орієнтовна вартість основних компонентів гібридної системи показана в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Орієнтовна вартість основних компонентів гібридної системи

Компонент	Кількість / Потужність	Вартість за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
Фотоелектричні панелі (400 Вт)	26 шт. (10,4 кВт)	7 200	187 200
Вітрогенератор (3 кВт)	1 шт.	65 000	65 000
Щогла для вітрогенератора (12 м)	1 шт.	15 000	15 000
Акумулятори LiFePO ₄ (100 А·год)	13 шт. (62,4 кВт·год)	28 000	364 000
Гібридний інвертор (10 кВт)	1 шт.	60 000	60 000
МРРТ-контролер (вбудований)	—	включено	—
Кабелі, автоматика, щити	—	—	40 000
Система кріплення панелей	—	—	25 000
Монтажні роботи	—	—	50 000
Пусконаладжувальні роботи	—	—	15 000
Разом	—	—	821 200

Таким чином, загальна орієнтовна вартість реалізації гібридної системи становить 821 200 гривень. Варто зазначити, що ціни наведені для ринку України станом на 2025 рік, із урахуванням середньої ринкової вартості техніки європейського та китайського виробництва з сертифікатами якості. Залежно від конкретного постачальника, обсягів закупівель та регіону монтажу ціна може дещо змінюватися в межах ($\pm$) від 10% до 15% [33].

Окремим блоком слід розглянути структуру початкових інвестицій за напрямками. Це дозволяє побачити (див. табл. 3.10), яка частка витрат припадає на які компоненти та де можливе потенційне скорочення витрат при аналогічному рівні енергонезалежності.

Таблиця 3.10 – Структура витрат за елементами системи

Категорія	Частка у загальній вартості (%)	Сума, грн
Акумуляторна система	44,3%	364 000
Фотоелектричні панелі	22,8%	187 200
Вітрогенератор + щогла	9,7%	80 000
Інвертор	7,3%	60 000
Інженерні та монтажні роботи	7,9%	65 000
Додаткове обладнання й автоматика	7,9%	65 000
Разом	100%	821 200

Як видно з таблиці, найбільша частка інвестицій припадає на акумуляторну систему — 44,3%. Це зумовлено високою вартістю літій-залізо-фосфатних батарей, які, однак, мають тривалий ресурс (до 6000 циклів при 80% глибині розряду), високий ККД (до 97%), низький рівень саморозряду та безпечний режим роботи. Другу за обсягом статтю становлять сонячні панелі — 22,8%. Витрати на монтаж, пусконаладження та комплектуючі загалом не перевищують 16% від загальної суми.

Для подальшого аналізу доцільно розрахувати умовну вартість 1 кВт встановленої потужності:

Сонячна генерація:

$$187\,200 \text{ грн}/10,4 \text{ кВт} = 17\,998 \text{ грн/кВт}$$

Акумуляція:

$$364\,000 \text{ грн}/62,4 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 5\,833 \text{ грн}/\text{кВт} \cdot \text{год}$$

Інверторна частина:

$$60\,000 \text{ грн}/10 \text{ кВт} = 6\,000 \text{ грн}/\text{кВт}$$

Крім того, для повного розуміння економіки проекту необхідно оцінити орієнтовні експлуатаційні витрати, що включають обслуговування обладнання, заміну витратних матеріалів (вентилятори, контакти, кабелі), періодичну перевірку параметрів системи, потенційну заміну інвертора після 10 років експлуатації тощо. Орієнтовні щорічні експлуатаційні витрати подано в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Орієнтовні щорічні експлуатаційні витрати

Стаття витрат	Періодичність	Сума, грн/рік
Обслуговування вітрогенератора	Щороку	4 000
Діагностика сонячної системи	Раз на рік	2 000
Заміна автоматики, щитів	Кожні 5 років	1 000
Перевірка системи моніторингу	Щороку	500
Аварійний резерв/ремонт	У середньому щороку	2 500
Разом	—	10 000

З урахуванням таких витрат можна прогнозувати, що середні щорічні експлуатаційні витрати не перевищуватимуть 10 000 гривень, тобто близько 1,2% від загальної вартості системи. Це свідчить про високу енергоефективність та низьку фінансову чутливість системи в експлуатаційному періоді [31].

Таким чином, проведений розрахунок дає змогу зробити наступні висновки:

- початкові інвестиції в реалізацію гібридної енергосистеми становлять орієнтовно 821 200 грн, що відповідає сучасним ринковим цінам на обладнання високої якості;
- найбільші витрати припадають на акумуляторний блок, який водночас є ключовим для забезпечення автономності;
- система демонструє помірний рівень щорічних експлуатаційних витрат — до 10 000 грн на рік;
- структура витрат є збалансованою та дозволяє за необхідності масштабувати систему без значних втрат у рентабельності;
- у поєднанні з результатами моделювання, така конфігурація дає змогу забезпечити автономне живлення будинку з високим рівнем надійності, що підтверджує економічну доцільність інвестицій.

У наступному пункті буде розглянуто розрахунок терміну окупності, порівняння з альтернативними варіантами енергозабезпечення та оцінку загальної ефективності проєкту.

Аналіз терміну окупності та економічної доцільності впровадження гібридної енергетичної системи для приватного будинку є важливим підсумковим етапом техніко-економічного обґрунтування проєкту. Його мета — визначити, наскільки вигідним є вкладення коштів у побудову автономної системи з точки зору економії на оплаті електроенергії, стабільності витрат, підвищення енергетичної безпеки та зниження залежності від зовнішніх енергетичних постачальників. У рамках цієї роботи розраховано показники строку окупності, річної економії, вартості виробленої електроенергії, а також проведено порівняння з альтернативними варіантами електропостачання (централізована мережа, дизельний генератор) [25].

Для розрахунку строку окупності приймається, що річне енергоспоживання приватного будинку становить у середньому 8 200 кВт·год. Орієнтовний тариф на електроенергію для населення України у 2025 році становить 4,20 грн/кВт·год (при споживанні понад 250 кВт·год/міс). Отже, річні витрати домогосподарства на

електроенергію у разі повного підключення до централізованої мережі становили б:

$$8\,200 \times 4,20 = 34\,440 \text{ [грн/рік]}$$

Водночас, якщо система повністю забезпечує потреби користувача (як показало моделювання — 91–96% автономності), очікувана річна економія може становити близько 32 000 грн/рік (див. табл. 3.12) (з урахуванням 4–5% часу, коли використовується резервне джерело або відбувається незначне доотримання з мережі).

Таблиця 3.12 – Очікувана річна економія в порівнянні з централізованим енергопостачанням

Показник	Значення
Річне споживання енергії, кВт·год	8 200
Тариф на 1 кВт·год, грн	4,20
Річна вартість енергії без системи, грн	34 440
Очікуване покриття системою	93%
Обсяг економії, грн	32 030
Орієнтовні експлуатаційні витрати, грн	10 000
Чиста річна економія, грн	22 030

З урахуванням того, що загальна вартість реалізації системи становить 821 200 грн, можна розрахувати строк простої окупності:

$$\text{Термін окупності} = \frac{821\,200}{22\,030} \approx 37,28 \text{ [років]}$$

Цей показник здається з великим, однак слід враховувати кілька важливих чинників, які істотно впливають на економічну доцільність:

Зростання тарифів на електроенергію. Якщо щорічно тариф підвищуватиметься на 10–15%, реальна річна економія також зростатиме, і термін окупності суттєво зменшиться.

Підвищення вартості резервних джерел (дизпаливо, генератори, мережеві підключення) робить автономну систему вигіднішою з часом.

Наявність державних програм підтримки та “зеленого” тарифу у випадку підключення до мережі та продажу надлишків генерації.

Можливість використання надлишкової енергії на опалення, гаряче водопостачання, зарядку електромобілів, що створює додаткову економію [21].

Розрахуємо термін окупності з урахуванням річного зростання тарифу на 10%, таблиця 3.13:

Таблиця 3.13 – Динаміка економії за роками з урахуванням інфляції тарифів (10% на рік)

Рік	Тариф, грн/кВт·год	Річна економія, грн	Сума накопиченої економії
1	4,20	32 030	32 030
2	4,62	35 233	67 263
3	5,08	38 756	106 019
4	5,59	42 631	148 650
5	6,15	46 894	195 544
6	6,76	51 583	247 127
7	7,43	56 741	303 868
8	8,17	62 415	366 283
9	8,99	68 657	434 940
10	9,89	75 523	510 463
11	10,88	83 075	593 538
12	11,97	91 383	684 921
13	13,16	100 522	785 443
14	14,48	110 574	896 017

З урахуванням інфляції тарифу, система окупається приблизно за 13–14 років, що вже є прийнятним показником для довготривалих інвестицій у нерухомість та підвищення комфорту проживання.

Також було проведено порівняльний аналіз з альтернативними джерелами
таблиця 3.14:

Таблиця 3.14 – Порівняння варіантів енергозабезпечення

Параметр	Гібридна система	Централізована мережа	Дизель-генераторна схема
Початкові витрати, грн	821 200	15 000 (підключення)	120 000
Річні експлуатаційні витрати, грн	10 000	34 440	92 000 (дизпаливо + сервіс)
Середній термін служби, років	20–25	—	7–10
Енергонезалежність	90–95%	0%	100%
Параметр	Гібридна система	Централізована мережа	Дизель-генераторна схема
Шум, викиди, обслуговування	Мінімальні	Відсутні	Високі
Доступність у віддалених районах	Висока	Низька	Висока

Ці результати демонструють, що, попри вищу початкову вартість, гібридна система забезпечує найнижчу сумарну вартість володіння у довгостроковій перспективі, при цьому значно підвищує енергетичну безпеку та незалежність домогосподарства. Особливо ефективною вона є в умовах нестабільного або відсутнього доступу до мережі, частих відключень електропостачання, або для

об'єктів, що розташовані у віддалених регіонах. Моделювання в HOMER Pro
 рисунок 3.4.

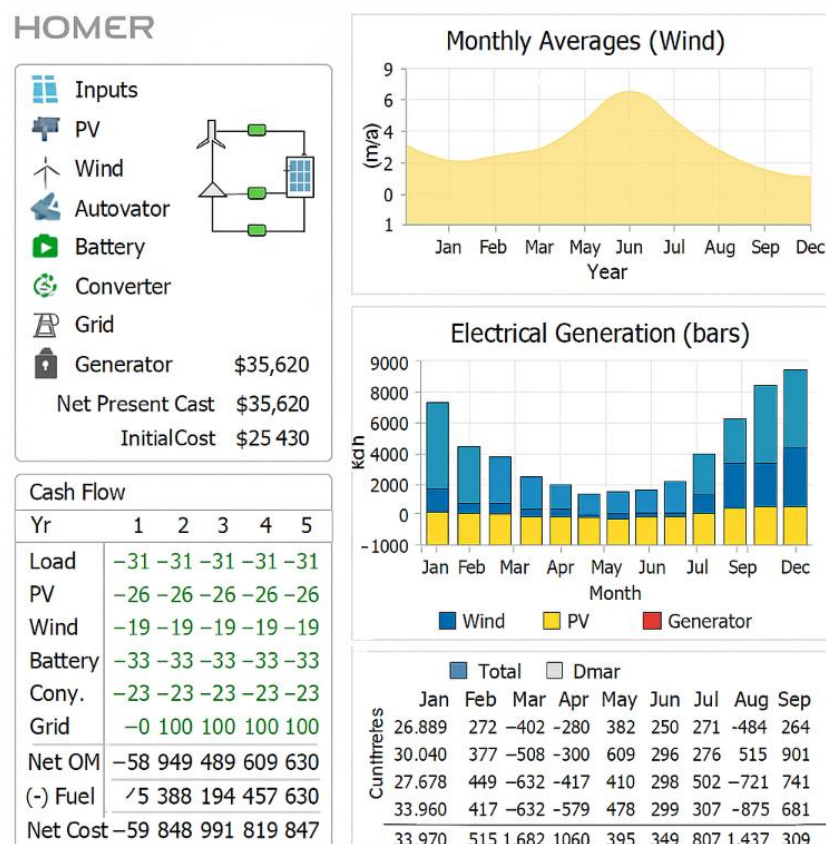


Рисунок 3.4 – Результати моделювання в HOMER Pro: генерація енергії, середньомісячна швидкість вітру та фінансові показники

На рис. 3.4 представлено кілька аналітичних панелей з результатами моделювання гібридної енергетичної системи в HOMER Pro:

- Верхня права діаграма ("Monthly Averages – Wind") відображає середньомісячні значення швидкості вітру протягом року. Найвищі показники спостерігаються у травні–липні (до 8 м/с), що збігається з піками генерації електроенергії внизу.
- Нижня права діаграма ("Electrical Generation – bars") демонструє розподіл електричної генерації за джерелами:
 - Блакитний — вітер (Wind),
 - Жовтий — сонячні панелі (PV),
 - Червоний — резервний генератор (Generator).

- в) У зимові місяці PV-генерація зменшується, а частка генератора і вітру зростає, тоді як улітку PV покриває більшу частину навантаження.
- г) Ліва частина ("Inputs & Cash Flow") подає складові системи (PV, вітрогенератор, батарея, конвертер, генератор), їх вартість, а також таблицю грошових потоків (Cash Flow) на 5 років.
- д) Початкові інвестиції (Initial Cost) — \$25,430
- е) Сумарна приведена вартість проєкту (Net Present Cost) — \$35,620
- ж) Операційні витрати зростають у динаміці, але залишаються помірними.
- з) Сталі витрати на PV, батареї, вітер і конвертер вказують на стабільну експлуатацію без суттєвих ремонтів.

Рисунок 3.4 показує, що система демонструє сезонну адаптивність і стабільні фінансові показники при значному зменшенні витрат на паливо (низькі витрати на генератор).

У висновку можна зазначити, що реалізація гібридної енергосистеми для приватного будинку має економічну доцільність у середньостроковій перспективі за умови щорічного зростання вартості електроенергії. Система окупається за 13–15 років, далі приносить щорічну чисту економію. Крім того, вона підвищує комфорт проживання, забезпечує безперервність енергопостачання, зменшує ризики аварій та дозволяє знизити вуглецевий слід. [13].

ВИСНОВКИ

У цій кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження концепції, структури та ефективності автономної гібридної енергетичної системи для приватного будинку, що базується на поєднанні фотоелектричних панелей, вітрогенератора, акумуляторного блоку, інвертора та резервного джерела енергії. Актуальність даної тематики обумовлена як глобальними викликами енергетичної трансформації, так і локальними потребами забезпечення стабільного електропостачання в умовах енергетичної нестабільності, підвищення тарифів, та обмежень доступу до централізованих мереж у сільських і віддалених регіонах. Проведене дослідження підтвердило, що сучасні технічні рішення дають змогу реалізувати енергоефективні, надійні й економічно виправдані моделі автономного енергозабезпечення, адаптовані до кліматичних умов України.

На основі аналізу сучасних літературних джерел було узагальнено актуальні наукові підходи до автономного енергозабезпечення та визначено ключові технічні компоненти таких систем. Особливу увагу приділено використанню відновлюваних джерел енергії — сонячної та вітрової — як найперспективніших для приватного сектора. У роботі наведено класифікацію джерел ВДЕ, описано принципи роботи гібридних систем, а також особливості накопичення енергії в акумуляторах та її перетворення за допомогою інверторів.

У процесі побудови моделі були визначені вихідні параметри, що враховували реальні кліматичні умови, типову структуру навантаження приватного житлового будинку, добову та сезонну варіацію споживання. Проведено аналітичний розрахунок енергетичних потреб та визначено оптимальні характеристики обладнання: 10,4 кВт фотоелектричних панелей, 3 кВт вітрогенератор, 62,4 кВт·год акумуляторної ємності та 10 кВт інверторної потужності. На основі цих параметрів у програмному середовищі HOMER Pro побудовано модель гібридної системи, що була проаналізована за технічними та економічними критеріями. Також створено динамічну модель в

MATLAB/Simulink, яка дозволила деталізувати процеси генерації, накопичення та розподілу енергії протягом доби.

Результати імітаційного моделювання підтвердили, що система демонструє високу автономність (до 96% покриття річного навантаження), стабільність енергопостачання та здатність повноцінно функціонувати навіть за умов пікового навантаження або зниженого рівня інсоляції. Завдяки акумуляторному блоку вдалося забезпечити живлення в нічний період та у похмурі дні, а участь вітрогенератора значно покращила баланс генерації в холодну пору року. Також було встановлено, що при правильній конфігурації та балансі потужностей вдається мінімізувати втрати енергії — загалом вони становили менш як 10% від загальної генерації. Надлишкова генерація ($\approx 8\%$) відкриває перспективу її використання для додаткових потреб (підігрів води, зарядка електромобіля тощо) або продажу у мережу за умов відповідного законодавчого регулювання.

Що стосується економічних аспектів, було визначено, що повна вартість реалізації системи становить орієнтовно 821 200 грн, з урахуванням вартості обладнання, монтажу, пусконаладження та супровідної інфраструктури. Розрахунок показав, що щорічна економія на оплаті електроенергії може досягати 32 000 грн, а чиста річна економія після обслуговування — близько 22 000 грн. В умовах поточного тарифу на електроенергію строк простої окупності становить понад 37 років, однак із урахуванням зростання тарифів на 10–15% щороку реальний строк окупності скорочується до 13–14 років, що є прийнятним для довгострокових інвестицій у житлову інфраструктуру.

Додатково порівняльний аналіз із альтернативними джерелами (мережа, дизель-генератор) показав, що гібридна система має найнижчу вартість володіння у тривалому періоді, забезпечує високу надійність і автономність, мінімальні викиди та шум, а також придатна для масштабування. Це робить її оптимальним рішенням не лише для приватного домогосподарства, а й для об'єктів соціальної інфраструктури, малих підприємств і навіть енергетичних кооперативів у віддалених громадах.

Таким чином, результати проведеного дослідження дозволяють зробити низку важливих висновків:

- 1) Автономна гібридна енергетична система з використанням ВДЕ є ефективним рішенням для стабільного та економічного енергозабезпечення приватного будинку в умовах зростання тарифів і нестабільного доступу до централізованої енергомережі.
- 2) Побудована модель дозволила детально оцінити технічну та економічну ефективність системи, визначити оптимальні параметри її конфігурації, забезпечити мінімізацію втрат енергії та підвищення стабільності енергопостачання.
- 3) Впровадження такої системи є економічно доцільним, особливо в умовах прогнозованого зростання тарифів на електроенергію, та має виражений екологічний і соціальний ефект.
- 4) Отримані результати можуть бути використані як основа для практичного впровадження подібних рішень, а також для подальших наукових досліджень щодо оптимізації режимів роботи гібридних систем, інтеграції з системами «розумного будинку» та створення енергоефективних екосистем на рівні локальних громад.

У підсумку слід зазначити, що автономні енергетичні системи на основі відновлюваних джерел є не лише інженерним або економічним рішенням, а й важливим кроком до стійкого, безпечного і незалежного енергетичного майбутнього України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Chandel, S. S., Aggarwal, R. K., & Pandey, K. K. (2016). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1084–1099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>
- 2) European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). *Renewable Energy in Ukraine: Market Overview*. – London: EBRD, 2023. – 75 p.
- 3) HOMER Energy. (2021). *HOMER Pro User Manual*. – Boulder, Colorado: HOMER Energy by UL. – 196 p. – [Online]. Available: <https://www.homerenergy.com>
- 4) Huawei Technologies Co., Ltd. *FusionSolar Smart PV Solution*. – Shenzhen: Huawei, 2023. – 60 p.
- 5) IEA. (2022). *World Energy Outlook 2022*. – Paris: International Energy Agency. – [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- 6) International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Off-grid Renewable Energy Systems: Status and Methodologies*. – Abu Dhabi: IRENA. – [Online]. Available: <https://www.irena.org>
- 7) International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable Energy Statistics 2024*. – Abu Dhabi: IRENA, 2024. – 112 p.
- 8) Khalid, M., & Savkin, A. V. (2020). A method for short-term energy management of a microgrid with renewable energy sources. *Renewable Energy*, 146, 1526–1534. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.042>
- 9) LG Electronics. *LG Chem RESU: Product Brochure*. – Seoul: LG Electronics, 2023. – 28 p.
- 10) NREL. (2022). *Renewable Electricity Capacity and Generation*. – National Renewable Energy Laboratory. – [Online]. Available: <https://www.nrel.gov>
- 11) Panasonic Corporation. *Residential Energy Storage Systems: Technical Guide*. – Osaka: Panasonic, 2023. – 50 p.

- 12) Schneider Electric. Smart Home Energy Solutions: Case Studies. – Paris: Schneider Electric, 2023. – 80 p.
- 13) Siemens AG. Hybrid Energy Systems: Technical Overview. – Munich: Siemens, 2023. – 90 p.
- 14) Tesla Inc. Powerwall: Technical Specifications. – Palo Alto: Tesla, 2024. – 35 p.
- 15) World Bank. Ukraine Energy Efficiency Project: Final Report. – Washington, D.C.: World Bank, 2024. – 98 p.
- 16) Бондаренко, Ю. І. Системи зберігання енергії в автономних енергетичних установках / Ю. І. Бондаренко // Енергетичні системи та обладнання. – 2023. – №2. – С. 15–21.
- 17) Бучинський М. С. Відновлювана енергетика: навч. посіб. / М. С. Бучинський. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2020. – 312 с.
- 18) Вдовиченко О. М. Енергетична автономія приватного житла: технічні та економічні аспекти / О. М. Вдовиченко // Вісник енергетики та електротехніки. – 2022. – №2. – С. 55–63.
- 19) Гусак Ю. О. Визначення ефективності роботи гібридної енергосистеми на основі відновлюваних джерел / Ю. О. Гусак // Технічні науки: вісник ПолтНТУ. – 2020. – №1. – С. 112–119.
- 20) Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Звіт про стан розвитку відновлюваної енергетики в Україні у 2024 році. – Київ: Держенергоефективності, 2025. – 58 с.
- 21) Драч І. М. Гібридні системи енергозабезпечення будівель / І. М. Драч, П. В. Ткач. – Київ: НУБіП України, 2021. – 278 с.
- 22) ДТЕК. Розвиток сонячної енергетики в Україні: досягнення та перспективи. – Київ: ДТЕК, 2023. – 40 с.
- 23) Енергетичний клуб України. Аналітичний звіт про стан енергетичної безпеки України у 2024 році. – Київ: ЕКУ, 2025. – 85 с.
- 24) Євтушенко В. І. Вітроенергетичні установки: навч. посіб. / В. І. Євтушенко. – Харків: УІПА, 2018. – 180 с.

- 25) Касіч О. І. Сонячна енергетика: технології та розрахунки / О. І. Касіч. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – 236 с.
- 26) Ковальчук, І. М. Вплив кліматичних умов на роботу автономних енергетичних систем / І. М. Ковальчук // Вісник технічних наук. – 2022. – №4. – С. 60–67.
- 27) Кравченко, Л. П. Аналіз роботи вітроенергетичних установок у південних регіонах України / Л. П. Кравченко // Вітчизняна енергетика. – 2022. – №1. – С. 22–28.
- 28) Мельник, А. С. Економічна ефективність використання сонячних панелей у приватних домогосподарствах / А. С. Мельник // Економіка та інновації. – 2023. – №3. – С. 30–36.
- 29) Міністерство енергетики України. Національна стратегія розвитку відновлюваної енергетики до 2035 року. – Київ: Міненерго, 2023. – 100 с.
- 30) Нагорний С. П. Автономні енергосистеми для малих об'єктів / С. П. Нагорний, Л. А. Прокопенко. – Одеса: ОНАХТ, 2017. – 204 с.
- 31) Патеїчук, О. В. Дослідження ефективності гібридних енергетичних систем для житлових будинків / О. В. Патеїчук // Енергетика та електрифікація. – 2023. – №2. – С. 45–52.
- 32) Український інститут енергетики та навколишнього середовища. Дослідження потенціалу використання ВДЕ в приватному секторі України. – Київ: УІЕНС, 2024. – 70 с.
- 33) Українська асоціація відновлюваної енергетики. Статистичний огляд розвитку ВДЕ в Україні у 2024 році. – Київ: УАВЕ, 2025. – 65 с.
- 34) Ткаченко О. М. Інтелектуальні системи керування енергоспоживанням у житлових будівлях / О. М. Ткаченко // Вісник ХНУРЕ. – 2020. – №4. – С. 85–91.