

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет інженерних систем та екології
Випускова кафедра теплотехніки
Освітній ступінь «магістр за ОПШ»
Спеціальність 144 «Теплоенергетика»
Освітня програма “Енергетичний менеджмент, енергоефективні
муніципальні та промислові теплові технології”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри теплотехніки
_____ Михайло КИРИЧЕНКО
«__» _____ 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

_____ Юрик Владислави Олександрівни

(прізвище, ім'я та по батькові здобувача)

1. Тема роботи: Система інженерного забезпечення садибного будинку з фотоелектричною станцією та тепловим насосом «повітря-вода» затверджена наказом ректора КНУБА № _____ від «__» ____ 2025 року

2. Керівник роботи: Погосов Олександр Григорович
_____ канд.тех.наук,доцент

(прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання здобувачем роботи до захисту _____

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

P. 1. Огляд сучасних систем комбінованого теплопостачання з джерелом резервного електропостачання

P. 2. Оцінка життєвого циклу проекту сонячної фотоелектричної станції

P. 3. Технічні рішення системи сонячної генерації

P. 4. Експериментальні дослідження роботи сонячної електричної станції потужністю 15 квт в київській області

P. 5. Вплив зовнішніх чинників на роботу сонячної електричної станції

Р.6. Комбінована робота теплового насосу на сонячній електричній станції

5. Графічний матеріал за розділами

Р. 6. Принципова схема теплопостачання будинку (Аркуш 1)

Р. 6 Плани вентиляції та кондиціонування першого та другого поверхів (Аркуш 2)

Р. 6 Плани опалення першого та другого поверхів (Аркуш 3)

Р. 3 Загальний вигляд будинку, на плоскій покрівліяного встановлено побутову сонячну електростанцію. Приклад погодинних даних, отримані за результатами моніторингу. Система інвертора, акумулятора і обв'язки ФЕМ (Аркуш 4)

Р. 4. Блок-схема електростанції. Графік виробництва електричної енергії і споживання за лютий 2025 року. Графік виробництва електричної енергії і споживання за червень 2025 року. Графік виробництва електричної енергії (Аркуш 5)

Р. 4 Добовий графік виробництва і споживання електричної енергії за 15.08.2025. Добовий графік виробництва і споживання електричної енергії за 29.10.2025. Добовий графік виробництва і споживання електричної енергії за 29.10.2025. Аналіз електричної енергії за жовтень 2025 (Аркуш 6)

Р. 4 Таблиця моніторингу даних (Аркуш 7)

Р. 4 Математичні моделі (Аркуш 8)

Р. 4. Модель виробництва електроенергії для ФВ-модулів з порівнянням із реальними даними (Аркуш 9)

Р.4. Результати розрахунку сонячної радіації та генерації електроенергії. Порівняння даних комп'ютерної моделі та експериментальних вимірювань при оптимальному куті нахилу $\beta = 38^\circ$ (Аркуш 10)

Р. 5. Порівняння середньомісячної генерації електроенергії ФВ-станції зі споживанням теплового насоса. Розміщення ФЕМ на даху будинку з основними геометричними параметрами та елементами кріплення (фрагмент робочого проекту) (Аркуш 11)

Календарний план виконання роботи:

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1. Огляд сучасних систем комбінованого теплопостачання з джерелом резервного електропостачання	11.10.2025 р.

Розділ 2. Оцінка життєвого циклу проекту сонячної фотоелектричної станції	18.10.2025 р.
---	---------------

Розділ 3. Технічні рішення системи сонячної генерації	25.10.2025 р.
Розділ 4. Експериментальні дослідження роботи сонячної електричної станції потужністю 15 квт в київській області	15.11.2025 р.
Розділ 5. Вплив зовнішніх чинників на роботу сонячної електричної станції	22.11.2025 р.
Розділ 6. Комбінована робота теплового насоса на сонячній електричній станції	24.11.2025 р.
Остаточне оформлення роботи	29.11.2025 р.
Направлення роботи для перевірки на плагіат	10.12.2025 р.
Попередній захист роботи на випусковій кафедрі	15.12.2025 р.
Направлення роботи на рецензування	15.12.2025 р.

Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.	д.т.н. Скочко В.І.		
Розділ 2.	д.т.н. Скочко В.І.		
Розділ 3.	Директор ПП"ІТС" Нігован Є.О.		
Розділ 4.	Директор ТОВ"НВП"Енергопромснаб Смілян М.С.		
Розділ 5	Директор ТОВ"НВП"Енергопромснаб Смілян М.С.		

Дата видачі завдання 10.10.2025 р.

Керівник _____ Погосов О.Г.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Здобувач _____ Юрик В.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
Факультет інженерних систем і екології
Кафедра теплотехніки**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ МАГІСТР**

на тему:

**Система інженерного забезпечення садибного будинку з
фотоелектричною станцією та тепловим насосом «повітря-вода»**

Юрик Владислава Олександрівна

Київ 2025 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ
Факультет інженерних систем і екології
Кафедра теплотехніки**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Михайло КИРИЧЕНКО
« ____ » _____ 2025 року

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗДОБУВАЧА СТУПЕНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ МАГІСТР**

**Система інженерного забезпечення садибного будинку з
фотоелектричною станцією та тепловим насосом «повітря-вода»**

Як здобувач вищої освіти КНУБА розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Здобувач **Юрик Владислава
Олександрівна**
144 «Теплоенергетика»
ОПП «Теплогазопостачання і
вентиляція»
Група ТЕМ-24
Керівник: **Погосов О.Г.**
доцент, кандидат технічних наук

Рецензент

Ідентичність підтверджую

Київ 2025 р.

РЕЗЮМЕ (SUMMARY) до кваліфікаційної роботи здобувача:		Юрик Владислава Олександрівна Yurik Vladislava Oleksandrivna	
ЗВО	Київський національний університет будівництва і архітектури		
Тема (українською та англійською)	Система інженерного забезпечення садибного будинку з фотоелектричною станцією та тепловим насосом «повітря-вода» Engineering security system for a garden shed with a photovoltaic station and a water-to-water heat pump		
Освітній ступінь	Магістр		
Факультет	Інженерних систем та екології		
Випускова кафедра	Теплотехніки		
Спеціальність	144 "Теплоенергетика"		
Освітня програма	Енергетичний менеджмент, енергоефективні муніципальні та промислові теплові технології		
Керівник	Погосов Олександр Григорович		
Обсяг роботи:	пояснювальна записка, стор.	розділів	креслень формату А1
	111	6	10
Розділ 1.	Огляд сучасних систем комбінованого теплопостачання з джерелом резервного електропостачання		
Розділ 2.	Оцінка життєвого циклу проекту сонячної фотоелектричної станції		
Розділ 3.	Технічні рішення системи сонячної генерації		
Розділ 4.	Експериментальні дослідження роботи сонячної електричної станції потужністю 15 квт в київській області		
Розділ 5.	Вплив зовнішніх чинників на роботу сонячної електричної станції		
Розділ 6.	Комбінована робота теплового насоса на сонячній електричній станції		
Висновки по роботі:	Робота виконана на високому рівні та заслуговує позитивної оцінки, а її автор присвоєння освітнього ступеня "магістр".		
Ключові слова: Keywords:	Система інженерного забезпечення будівель, теплоенергетика, теплові насоси типу «повітря-вода», фотоелектрична станція, відновлювані джерела енергії, автономне енергозабезпечення, енергоефективні будівлі, теплопостачання та гаряче водопостачання, низькотемпературні системи опалення, інтеграція ВДЕ в будівлі, баланс енергоспоживання, теплотехнічні розрахунки, моделювання енергетичних систем, оптимізація енергоспоживання, економічна ефективність, окупність інженерних рішень. Building engineering systems, thermal engineering, air-to-water heat pumps, photovoltaic power plant, renewable energy sources, autonomous energy supply, energy-efficient buildings, heating and domestic hot water systems, low-temperature heating systems, integration of renewable energy in buildings,		

	<i>energy consumption balance, thermal calculations, energy system modeling, energy consumption optimization, economic efficiency, payback of engineering solutions.</i>
--	--

Здобувач: _____/Владислава ЮРИК/

Керівник: _____/Олександр ПОГОСОВ/

“ ___ ” _____ 20__ року

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ КОМБІНОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ДЖЕРЕЛОМ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	13
1.1 Вплив кліматичних змін на роботу фотоелектричних систем.....	13
1.2 Тенденції розвитку фотоелектричних систем у Європі.....	16
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ПРОЕКТУ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	38
2.1. Технологічні особливості та класифікація сонячних фотоелектричних систем.....	38
2.2. Інноваційні підходи та енергетична ефективність проектів сонячних електростанцій.....	40
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ СИСТЕМИ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ.....	53
3.1. Архітектура та основні компоненти системи сонячної генерації.....	53
3.2. Інтелектуальні технології, безпека та перспективи розвитку сонячних систем.....	55
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ПОТУЖНІСТЮ 15 КВТ В КИЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ.....	61
4.1. Методика проведення експериментальних досліджень та характеристика об'єкта.....	61
РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА РОБОТУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ.....	64
5.1. Кліматичні особливості експлуатації сонячних електростанцій у Київській області.....	64
5.2. Експериментальні дослідження впливу снігового покриву та метеоумов на роботу ФЕС.....	67

РОЗДІЛ 6. КОМБІНОВАНА РОБОТА ТЕПЛОВОГО НАСОСУ НА СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ	83
6.1. Уточнена модель генерації електричної енергії з СЕС	83
6.2. Застосування СЕС в якості джерела електричної енергії для теплового насосу в системі тепlopостачання індивідуального житлового будинку	95
ВИСНОВКИ.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	101
ДОДАТКИ.....	109

1. ВСТУП

Фотоелектрична станція з пріоритетом роботи на продаж в мережу та з підключенням теплогенеруючого обладнання в індивідуальному житловому будинку Київської області є сучасним інженерним рішенням, яке поєднує у собі елементи відновлюваної енергетики, енергонезалежності та ефективного керування побутовими енергоспоживачами. Такий тип системи особливо актуальний у нинішніх умовах енергетичної нестабільності, зростання тарифів на енергоносії та активного розвитку децентралізованої генерації в Україні.

Основою енергетичної системи слугує фотоелектрична установка загальною потужністю 12,87 кВт, змонтована на основі 22 високоефективних монокристалічних модулів Jinko Solar JKM585N-72HL4-V типу N-Type. Ці панелі, завдяки своїй високій питомій продуктивності та низькому рівню деградації, забезпечують надійну та прогнозовану генерацію електроенергії протягом щонайменше 25–30 років експлуатації. Загальна площа сонячного поля становить 52,4 м², що дозволяє оптимально використати дахову або наземну поверхню в межах приватної садиби. Сонячні модулі працюють у поєднанні з гібридним інвертором, який забезпечує синхронізацію з мережею, ефективну зарядку/розрядку акумуляторів, а також можливість продажу надлишкової електроенергії в енергомережу за допомогою механізму «зеленого тарифу» або інших форм Net Metering.

Об'єктом дослідження є комплекс інженерних систем (система опалення і охолодження на базі теплового насосу повітря-вода + фотовольтаїчна електрична станція, яка живить електричною енергією тепловий насос) садибного житлового будинку, який розміщений в с. Гостомель Київської області.

Принцип роботи системи побудований за моделлю з пріоритетом продажу в мережу, що означає — після задоволення поточних споживчих

навантажень будинку, вся надлишкова енергія автоматично спрямовується на зовнішню мережу. Такий підхід дозволяє максимізувати прибутковість інвестицій у фотоелектричну станцію та швидше досягти окупності системи. У моменти, коли генерація перевищує споживання, енергія не «губиться», а перетворюється в додатковий фінансовий дохід. Система керування дозволяє виставляти конкретні пріоритети — наприклад, продавати все надлишкове після зарядки акумулятора або навпаки, продавати одразу, а зарядку виконувати лише за умов нульового попиту.

Окрему роль у системі відіграє акумулятор Felicity LPBF48200-H типу LiFePO₄ з номінальною напругою 51,2 В і ємністю 200 А·год (еквівалентно ~10 кВт·год). Його застосування дозволяє суттєво підвищити гнучкість системи та її адаптивність до змін енергоспоживання або нестабільної генерації. Вночі, коли сонячне світло відсутнє, або в періоди підвищеного споживання — наприклад, при одночасній роботі теплогенераторів — акумулятор слугує основним джерелом живлення. Це дозволяє мінімізувати або повністю виключити споживання з мережі, особливо в періоди пікових тарифів. Акумулятор також виконує роль резервного джерела енергії у випадках аварійного відключення централізованого електропостачання, що є додатковим плюсом у сільській чи заміській місцевості.

Ключовою особливістю системи є наявність теплогенеруючого обладнання, зокрема електричних ТЕНів або теплового насоса, які інтегровані у загальну схему енергозабезпечення будинку. У дні з високою сонячною активністю, коли після продажу надлишків і зарядки акумулятора все ще залишається енергія, система автоматично спрямовує її на обігрів — наприклад, для підігріву води в бойлері, роботи підлогового опалення або підтримки температури у буферній ємності. Таким чином, частина сонячної енергії перетворюється не лише на фінансовий дохід, а й безпосередньо на теплову енергію, підвищуючи енергоефективність будинку в цілому.

Для вибору оптимальної конфігурації системи були використані дані з українського сервісу meteorpost.com, який дозволив провести точний аналіз інсоляційного потенціалу конкретної ділянки в Київській області. На основі історичних метеоданих та прогнозних моделей було визначено, що середньорічне надходження сонячної енергії на площину установки дозволяє очікувати генерацію близько 12–14 МВт·год електроенергії на рік. Виходячи з цього, було підібрано відповідне обладнання, а також розраховано можливі обсяги продажу електроенергії в мережу, споживання в побутових цілях та покриття теплових навантажень.

У підсумку, проект фотоелектричної станції з пріоритетом продажу в мережу та паралельною підтримкою теплогенеруючого обладнання демонструє ефективну модель сучасного енергоефективного приватного будинку. Він поєднує в собі можливість економії, заробітку та комфортного проживання без залежності від централізованих енергетичних структур. Такий підхід відповідає не лише технічним і економічним трендам сучасності, а й глобальним екологічним цілям переходу до сталих форм енергоспоживання.

Фотоелектрична станція з пріоритетом роботи на продаж в мережу та з підключенням теплогенеруючого обладнання в індивідуальному житловому будинку Київської області є сучасним інженерним рішенням, яке поєднує у собі елементи відновлюваної енергетики, енергонезалежності та ефективного керування побутовими енергоспоживачами. Такий тип системи особливо актуальний у нинішніх умовах енергетичної нестабільності, зростання тарифів на енергоносії та активного розвитку децентралізованої генерації в Україні.

Основою енергетичної системи слугує фотоелектрична установка загальною потужністю 12,87 кВт, змонтована на основі 22 високоефективних монокристалічних модулів Jinko Solar JKM585N-72HL4-V типу N-Type. Ці панелі, завдяки своїй високій питомій продуктивності та низькому рівню деградації, забезпечують надійну та прогнозовану генерацію електроенергії

протягом щонайменше 25–30 років експлуатації. Загальна площа сонячного поля становить 52,4 м², що дозволяє оптимально використати дахову або наземну поверхню в межах приватної садиби. Сонячні модулі працюють у поєднанні з гібридним інвертором, який забезпечує синхронізацію з мережею, ефективну зарядку/розрядку акумуляторів, а також можливість продажу надлишкової електроенергії в енергомережу за допомогою механізму «зеленого тарифу» або інших форм Net Metering.

Принцип роботи системи побудований за моделлю з пріоритетом продажу в мережу, що означає — після задоволення поточних споживчих навантажень будинку, вся надлишкова енергія автоматично спрямовується на зовнішню мережу. Такий підхід дозволяє максимізувати прибутковість інвестицій у фотоелектричну станцію та швидше досягти окупності системи. У моменти, коли генерація перевищує споживання, енергія не «губиться», а перетворюється в додатковий фінансовий дохід. Система керування дозволяє виставляти конкретні пріоритети — наприклад, продавати все надлишкове після зарядки акумулятора або навпаки, продавати одразу, а зарядку виконувати лише за умов нульового попиту.

Окрему роль у системі відіграє акумулятор Felicity LPBF48200-H типу LiFePO₄ з номінальною напругою 51,2 В і ємністю 200 А·год (еквівалентно ~10 кВт·год). Його застосування дозволяє суттєво підвищити гнучкість системи та її адаптивність до змін енергоспоживання або нестабільної генерації. Вночі, коли сонячне світло відсутнє, або в періоди підвищеного споживання — наприклад, при одночасній роботі теплогенераторів — акумулятор слугує основним джерелом живлення. Це дозволяє мінімізувати або повністю виключити споживання з мережі, особливо в періоди пікових тарифів. Акумулятор також виконує роль резервного джерела енергії у випадках аварійного відключення централізованого електропостачання, що є додатковим плюсом у сільській чи заміській місцевості.

Ключовою особливістю системи є наявність теплогенеруючого обладнання, зокрема електричних ТЕНів або теплового насоса, які інтегровані у загальну схему енергозабезпечення будинку. У дні з високою сонячною активністю, коли після продажу надлишків і зарядки акумулятора все ще залишається енергія, система автоматично спрямовує її на обігрів — наприклад, для підігріву води в бойлері, роботи підлогового опалення або підтримки температури у буферній ємності. Таким чином, частина сонячної енергії перетворюється не лише на фінансовий дохід, а й безпосередньо на теплову енергію, підвищуючи енергоефективність будинку в цілому.

Для вибору оптимальної конфігурації системи були використані дані з українського сервісу meteorpost.com, який дозволив провести точний аналіз інсоляційного потенціалу конкретної ділянки в Київській області. На основі історичних метеоданих та прогнозних моделей було визначено, що середньорічне надходження сонячної енергії на площину установки дозволяє очікувати генерацію близько 12–14 МВт·год електроенергії на рік. Виходячи з цього, було підібрано відповідне обладнання, а також розраховано можливі обсяги продажу електроенергії в мережу, споживання в побутових цілях та покриття теплових навантажень.

У підсумку, проект фотоелектричної станції з пріоритетом продажу в мережу та паралельною підтримкою теплогенеруючого обладнання демонструє ефективну модель сучасного енергоефективного приватного будинку. Він поєднує в собі можливість економії, заробітку та комфортного проживання без залежності від централізованих енергетичних структур. Такий підхід відповідає не лише технічним і економічним трендам сучасності, а й глобальним екологічним цілям переходу до сталих форм енергоспоживання.

Важливим аспектом у функціонуванні такої системи є економічна доцільність та фінансове моделювання, яке дозволяє оцінити ефективність інвестицій у фотоелектричну установку з акумуляторним модулем і

теплогенератором. Враховуючи поточні ринкові ціни на електроенергію для побутових споживачів, вартість встановлення обладнання, а також можливі джерела компенсацій (державні або місцеві програми підтримки ВДЕ, гранти, кредити з пільговим відсотком тощо), можна прогнозувати строк окупності системи в межах 5–7 років. Після цього весь прибуток від продажу електроенергії в мережу фактично перетворюється на чистий дохід власника, а економія на опаленні та гарячій воді дає додатковий фінансовий ефект.

Окремо варто підкреслити вплив такої системи на стабільність енергомережі на локальному рівні. Масове впровадження домашніх фотоелектричних систем із можливістю продажу надлишкової енергії в години пікової генерації дозволяє зменшити навантаження на центральні ТЕС і АЕС, зменшити втрати електроенергії при транспортуванні, а також покращити баланс енергосистеми в цілому. У майбутньому це може дати змогу створювати локальні енергетичні кооперативи або мікромережі, де кілька будинків об'єднуються в спільну енергетичну систему, взаємодіють між собою та з мережею на гнучких умовах, формуючи так звані "енергетичні спільноти".

В контексті енергетичної безпеки, особливо в період воєнного стану, частих аварій на електромережах, сезонного дефіциту потужностей або загроз блекаутів, система, яка забезпечує будинок автономною генерацією, акумуляцією та резервним живленням, перетворюється на критично важливий елемент життєзабезпечення. У разі повного відключення централізованого електропостачання, фотоелектрична станція, завдяки акумулятору, забезпечить роботу основних побутових приладів, освітлення, систем опалення, а за потреби — і зарядку мобільних пристроїв, роботу холодильника, водяного насоса тощо. Це дозволяє власнику відчувати себе незалежним та захищеним в умовах будь-якої надзвичайної ситуації.

Також не менш важливою є екологічна складова — система повністю виключає використання викопних палив (газ, вугілля, мазут), не створює викидів CO₂, не забруднює повітря та не спричиняє шуму. Зменшення

«вуглецевого сліду» будинку завдяки використанню сонячної енергії та електроопалення дозволяє власнику долучитися до боротьби з кліматичними змінами. Крім того, це створює позитивний приклад для сусідів, громади чи навіть цілої адміністративної одиниці, стимулюючи розвиток культури енергоефективності та свідомого споживання ресурсів.

Слід зазначити також, що впровадження подібних систем з розширеною логікою роботи, включно з продажем у мережу, зарядкою та теплогенерацією, вимагає компетентного проектування, врахування норм будівельного та енергетичного законодавства, а також грамотного монтажу і налаштування. Кожен компонент — сонячні панелі, інвертор, акумулятор, контролери, автоматика — має бути підібраний з урахуванням сумісності, захисту від перенапруги, грозових розрядів, короткого замикання тощо. Особлива увага приділяється елементам заземлення, пожежної безпеки, погодостійкості обладнання (особливо якщо воно монтується зовні) та можливості віддаленого моніторингу й діагностики роботи системи через інтернет.

Підсумовуючи, можна сказати, що створення фотоелектричної станції з пріоритетом продажу в мережу та інтеграцією теплогенеруючого обладнання є не просто технічним рішенням, а комплексною енергетичною стратегією, що поєднує в собі інноваційність, енергонезалежність, екологічну відповідальність та фінансову вигідність. Це — приклад нової моделі енергоспоживання для українського приватного сектору, яка з кожним роком стає все більш актуальною, доступною та масовою. Київська область, як регіон з високим рівнем інсоляції, розвиненою інфраструктурою та активним ринком житлової забудови, має всі передумови для масштабного впровадження подібних систем, що зробить її одним із лідерів вітчизняної децентралізованої енергетики.

Загалом, проєкт фотоелектричної станції з пріоритетом роботи на продаж в мережу та з інтеграцією теплогенеруючого обладнання в індивідуальному житловому будинку Київської області є взірцем сучасного, комплексного підходу до організації енергонезалежного та енергоефективного побуту. Така

система успішно поєднує три ключові компоненти: генерацію відновлюваної енергії за допомогою сонячних модулів, ефективне управління споживанням і зберіганням енергії завдяки акумуляції, та раціональне використання надлишкової електроенергії на опалення й гаряче водопостачання.

Цей підхід не лише відповідає сучасним тенденціям глобальної децентралізації енергетики та декарбонізації, а й дозволяє досягти фінансової стабільності та автономності для конкретного домогосподарства. Він зменшує залежність від коливань тарифів, забезпечує стабільне тепло й електрику в будинку навіть за відсутності мережі, і при цьому створює додаткові можливості заробітку через продаж надлишкової енергії. Крім того, система позитивно впливає на екологію, зменшуючи викиди вуглецю та шкідливих речовин, а також формує нову культуру відповідального ставлення до енергоспоживання. У поєднанні з інтелектуальним керуванням, гнучкими сценаріями використання та можливістю масштабування в майбутньому, така енергосистема є надійною інвестицією як у власний комфорт, так і в майбутнє країни, яка стрімко рухається до "зеленої" трансформації.

Таким чином, розроблена модель не просто відповідає технічному завданню — вона є прикладом реальної трансформації традиційного житлового будинку в енергоактивний осередок, здатний забезпечити власні потреби, підтримати загальну енергосистему та демонструвати, як саме виглядає житло майбутнього — екологічне, автономне, прибуткове та абсолютно комфортне для людини.

Згадувані аспекти значно підвищують не лише технічну ефективність системи, а й її економічну та екологічну привабливість, створюючи перспективи для розвитку і масштабування подібних проектів у майбутньому. Наприклад, інтеграція смарт-технологій для моніторингу та управління енергоспоживанням забезпечує максимальний рівень комфорту для користувача, дозволяючи ефективно контролювати та оптимізувати споживання енергії. Завдяки віддаленому моніторингу, користувач може не

лише слідкувати за продуктивністю системи в реальному часі, але й адаптувати її налаштування для досягнення найбільш ефективних результатів. У разі інтеграції з іншими енергетичними джерелами, такими як електромобілі, система може стати ще більш автономною, відкриваючи додаткові можливості для використання енергії з електричних транспортних засобів, а також сприяючи підвищенню ефективності енергетичної інфраструктури.

Перспективи розвитку таких систем також включають можливість участі в механізмах ринкового регулювання, як то надання послуг з балансування мережі або регулювання частоти. Хоча в Україні ці механізми ще не на повну потужність працюють, в перспективі такі можливості дозволять активним споживачам не лише економити, а й отримувати додатковий прибуток за рахунок активної участі в енергетичних ринках. Окрім того, завдяки модульності таких систем, вони можуть бути масштабовані з урахуванням зростання потреб у енергії або можливості додавання нових елементів — сонячних панелей, акумуляторних модулів або навіть додаткових теплогенераторів для досягнення ще більшої автономії та енергетичної незалежності. Така гнучкість в підходах дозволяє зберігати високу ефективність навіть при зміні потреб чи умов експлуатації.

Економічно вигідними є також вкладення в такі системи з точки зору підвищення ринкової вартості нерухомості. Будинки з фотоелектричними системами, які забезпечують автономне теплопостачання та електроживлення, здобувають велику популярність серед покупців, адже вони гарантують економію на комунальних послугах і забезпечують безпеку у разі відключення електроенергії в мережі. Тому такі інвестиції можна розглядати як спосіб не тільки підвищити ефективність використання ресурсів, але й як фінансово вигідну стратегію для довгострокового розвитку житлової нерухомості.

Водночас, енергетична автономія, яку забезпечує така система, сприяє розвитку енергетичної безпеки на рівні домогосподарства і підтримує загальну мету країни — досягнення енергетичної незалежності. В умовах зростання інтересу до відновлювальних джерел енергії та активної підтримки «зелених» технологій на державному рівні, такі ініціативи можуть стати основою для децентралізації енергетичної системи України. Важливо зазначити, що в умовах зростаючого попиту на відновлювані джерела енергії та розвитку державних програм підтримки, таких як «зелений тариф» та інші форми заохочення до енергетичних інвестицій, впровадження подібних систем може стати ефективним інструментом для покращення економічної ситуації в країні.

Розглянуті переваги і можливості є лише початковою стадією великого потенціалу для розвитку таких систем в Україні. Згодом вони можуть стати стандартом для кожного будинку, що прагне до енергетичної незалежності та ефективного використання природних ресурсів. У свою чергу, це забезпечить значне покращення загального енергетичного балансу країни та сприятиме реалізації стратегії переходу до сталого розвитку.

Таке впровадження системи фотоелектричної станції з пріоритетом роботи на продаж в мережу та підключенням теплогенеруючого обладнання не тільки економічно вигідне для домогосподарства, а й має значний вплив на покращення екологічної ситуації в країні. Важливо, що подібні технології не лише знижують залежність від традиційних енергетичних ресурсів, а й демонструють нові можливості для оптимізації енергетичних потоків на локальному рівні.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ КОМБІНОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ДЖЕРЕЛОМ РЕЗЕРВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1 Вплив кліматичних змін на роботу фотоелектричних систем

В статті [1] аналізується робота фотоелектричних станцій в умовах кліматичних змін за допомогою моделей EURO-CORDEX. Оцінюється потенційний вплив змін сонячного випромінювання, температури та швидкості вітру на генерацію енергії до кінця XXI століття.

В умовах глобальних кліматичних змін, які призводять до значних змін температурних режимів, опадів і сезонних коливань, важливо розуміти, як ці зміни можуть вплинути на роботу фотоелектричних станцій (ФЕС). Оскільки сонячна енергетика є чутливою до таких факторів, як рівень сонячного випромінювання, тривалість світлового дня та погодні умови, прогнози впливу кліматичних змін на ефективність ФЕС є важливим етапом у плануванні та проектуванні таких об'єктів. Одним із потужних інструментів для таких прогнозів є моделі EURO-CORDEX, які використовуються для детального прогнозування майбутніх кліматичних умов на основі сценаріїв змін клімату.

Моделі EURO-CORDEX — це спільна ініціатива для моделювання регіональних кліматичних змін в Європі. Вони створюють детальні прогнози змін кліматичних умов на підставі глобальних кліматичних моделей і дозволяють враховувати специфічні характеристики кожного регіону, в тому числі зміну температури, рівня опадів, швидкості вітру та інших факторів, що можуть вплинути на ефективність фотоелектричних станцій. Дані, отримані з цих моделей, допомагають оцінити потенціал сонячної енергії в різних регіонах, а також прогнозувати, як ці умови змінюватимуться в майбутньому, в залежності від різних сценаріїв зміни клімату.

Одним із важливих аспектів роботи фотоелектричних станцій є їх ефективність, яка залежить від рівня сонячного випромінювання, що, в свою чергу, змінюється внаслідок кліматичних факторів. Моделі EURO-CORDEX можуть бути використані для оцінки змін у кількості сонячної радіації, що досягає поверхні Землі, зокрема в Україні та інших регіонах Східної Європи. Прогнози, отримані на основі таких моделей, допомагають зрозуміти, чи будуть наявні достатні рівні сонячної енергії для ефективної роботи ФЕС у майбутньому.

Для України, яка знаходиться в помірному кліматичному поясі з досить високим рівнем інсоляції, зміни клімату можуть призвести до деяких коригувань у прогнозах генерації сонячної енергії. Наприклад, підвищення температури може змінити кількість і тривалість сонячних днів, що вплине на кількість отримуваної енергії. Збільшення кількості екстремальних погодних явищ, таких як посухи або інтенсивні опади, також може мати вплив на здатність станції працювати з максимальною ефективністю.

Серед найбільших загроз для фотоелектричних станцій в умовах кліматичних змін можна виокремити:

1. Збільшення температури: висока температура може знизити ефективність роботи сонячних панелей, оскільки зростання температури на поверхні модулів призводить до зменшення їх електричної продуктивності.
2. Зміни у кількості опадів: зменшення кількості опадів у деяких регіонах може призвести до меншої кількості доступної води для охолодження панелей або зниження частоти злив, які можуть очищати панелі від бруду. В свою чергу, надлишок опадів або інтенсивні дощі можуть призвести до затоплення або пошкодження систем.
3. Екстремальні погодні явища: посухи, бурі, сильні вітри або снігопади можуть призвести до пошкодження обладнання, а також змінити умови

для ефективного використання сонячної енергії. Особливо це стосується потужних штормів або сильних вітрів, які можуть фізично пошкодити панелі або інші частини системи.

Враховуючи ці фактори, використання моделей EURO-CORDEX дозволяє передбачити, як зміни клімату можуть вплинути на ефективність фотоелектричних станцій в конкретному регіоні. Це важливо для довгострокового планування та адаптації інфраструктури, яка повинна бути готова до змінених кліматичних умов. Оцінка ймовірних змін у кількості доступної сонячної енергії дозволяє оптимізувати проекти для досягнення максимальної продуктивності в умовах змінного клімату.

В цілому, моделі EURO-CORDEX є важливим інструментом для прийняття рішень щодо інвестування в сонячну енергетику, дозволяючи оцінити ризики та прогнози, які можуть виникнути у зв'язку зі змінами клімату. Завдяки таким інструментам, можна створити більш стійкі та адаптовані до кліматичних змін системи, які будуть ефективно працювати навіть у майбутньому.

Отримано висновки, що в північних регіонах Європи зниження генерації може досягати 10–12%, тоді як у південних регіонах можливе незначне збільшення. При встановленій потужності прогнозується збереження стабільності генерації в більшості регіонів, однак у південних зонах спостерігається покращення щоденної стабільності виробництва. Негативний вплив температури, що знижує ефективність панелей на 3–5%, частково компенсується підвищенням сонячного випромінювання. Загалом, зміна клімату не становить значної загрози для фотоелектричного сектора Європи, але технологічні удосконалення, спрямовані на зменшення температурної залежності, є доцільними.

В статті також розглядається сценарій з високим проникненням фотоелектричних установок, згідно з Дорожньою картою Європейського

кліматичного фонду. Просторовий розподіл потужностей враховує мету досягнення 80% частки відновлюваної енергії до 2050 року. Розміщення фотоелектричних установок оптимізоване за доступністю сонячного ресурсу, виключаючи лісові та важкодоступні території. Отримані часові ряди генерації для встановленої потужності відображають прогноз змін виробництва в умовах зміни клімату, із збереженням стабільності у центральних та південних регіонах.

Таким чином, прогнозовані зміни клімату матимуть помірний вплив на європейський фотоелектричний сектор, проте необхідні технологічні адаптації для мінімізації втрат генерації.

2.2 Тенденції розвитку фотоелектричних систем у Європі

В статті [2] йдеться мова про вплив вугільної енергетики на екологію та здоров'я, а також перехід до відновлюваних джерел енергії на основі Паризької угоди. Умовами є збереження вугілля як основного джерела енергії в 42 регіонах ЄС, що спричиняє значні викиди CO₂ (14,5 Гт у 2017 році), метану, оксиду сірки та важких металів.

У 2017 році вугілля забезпечило 26,8% постачання первинної енергії та 38,4% виробництва електроенергії у світі, спричинивши 14,5 Гт викидів CO₂, або 44,3% від загального обсягу енергетичних викидів. Це вимагає скорочення викидів CO₂ до 1 Гт до 2040 року. Крім вуглекислого газу, вугільні станції виділяють токсичні сполуки, як-от діоксид сірки (SO₂), важкі метали (Hg, Pb), миш'як, кадмій, а також продукти, що викликають респіраторні захворювання та кислотні дощі.

Охолодження вугільних станцій потребує значних обсягів води. Системи охолодження діляться на одноразові (із поверненням підігрітої води до джерела), рециркуляційні (із використанням градиренів) та суші системи (які скорочують споживання води до 90%, але знижують загальну ефективність станцій). Забруднення водних ресурсів, викликане шахтами, включає виділення важких металів, таких як мідь і свинець, що впливає на пи

Для скорочення екологічного навантаження у 2018 році Європейська комісія опублікувала програму переходу до кліматично нейтральної економіки «Чиста планета для всіх», яка передбачає скорочення ролі вугілля в енергетиці до 2050 року та досягнення частки відновлюваної енергетики понад 60%. Альянс *Powering Past Coal* включає 80 членів

У ЄС у 42 регіонах вугілля залишається кількість джерел енергії, наявні 248 вугільних станцій (152,5 ГВт встановленої потужності).

Отримано висновки, що для досягнення цілої кліматичної нейтральності ЄС необхідно скоротити використання вугілля з 10,5 Гт до 1 Гт до 2040 року та збільшити збільшення відновлюваної енергетики до понад 60% до 2050 року. Зроблено висновки, що ключовими проблемами є забруднення води, підстав і утворення токсичної вугільної золи, які вимагають заміни вугільних станцій екологічними технологіями.

У статті [3] досліджується розвиток сонячної енергетики в країні в умовах значної залежності енергетичного сектору від вугілля. Аналізується взаємодія екологічних викликів, технічних обмежень та адміністративних вимог на різних етапах проєктування та будівництва сонячних електростанцій.

Автори проаналізували 67 перспективних місць розташування сонячних ферм, зокрема в північній і західній Польщі, і виокремили ключові фактори, що впливають на вибір ділянок. До основних критеріїв належать: рівність або південний ухил землі, доступ до ліній електропередач на відстані до 200 м, тверді під'їзні дороги та класи ґрунтів IV-VI. Для встановленої потужності 1 МВт рекомендується ділянка площею не менше 1,5 га.

Результати вказують, що головними перешкодами для розвитку фотоелектричних станцій є:

- Обмежена пропускна спроможність національної електромережі, що утруднює підключення нових станцій.
- Високі вимоги до адміністративних процедур, які включають отримання екологічних дозволів, погодження планування і технічних характеристик.

- Відсутність достатньої державної підтримки та спеціалізованих законодавчих механізмів.

Окрім цього, розглядається концепція "ємності хостингу" мережі, яка визначає межу прийняттого впливу сонячної енергії на розподільчу мережу. Понад цю межу можуть виникати проблеми, як-от зниження якості електроенергії, що вимагає технічних рішень для їх пом'якшення.

Дослідження демонструє значний потенціал для розвитку сонячної енергетики в Польщі, проте наголошує на необхідності реформ у законодавстві та вдосконаленні інфраструктури для сприяння подальшому впровадженню фотоелектричних технологій.

В статті [4] аналізується потенціал встановлення вертикальних сонячних панелей уздовж транспортної інфраструктури Європейського Союзу, зокрема вздовж основних доріг і залізниць. Використовуючи геопросторові дані, досліджено вплив таких факторів, як екологічні обмеження, обмеження землекористування та техніко-економічні аспекти. Отримано висновки, що потенційна потужність фотоелектричних систем становить 403 ГВт, що відповідає 55% цільової потужності сонячної енергії ЄС до 2030 року. За допомогою двосторонніх фотоелектричних модулів можливо виробляти 391 ТВт-год чистої електроенергії щорічно.

Зроблено висновки, що фотоелектричні системи вздовж залізниць можуть виробляти електроенергію, що в 2,5 рази перевищує поточне споживання залізничної мережі ЄС, а фотоелектричні установки вздовж доріг здатні забезпечити мережу зарядних станцій для електромобілів і сприяти зниженню використання викопного палива в транспорті. Крім того, витрати на паливо з PV систем в 2–3 рази нижчі, ніж на традиційний бензиновий транспорт. Найбільшу вигоду від цієї технології можуть отримати Кіпр і Латвія, покриваючи до 75% поточного споживання електроенергії на душу населення.

Запропонована методологія створює основу для планування декарбонізації транспортного сектору, зменшення конкуренції за

землекористування та скорочення викидів, що є важливими кроками до досягнення кліматичних цілей.

У статті [5] аналізується вплив зміни клімату на виробництво електроенергії середніми фотоелектричними системами на основі трьох сценаріїв кліматичних змін (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5), які описують різні рівні зростання концентрації парникових газів у атмосфері до кінця XXI століття. Дослідження охоплює три центральноєвропейські регіони (Дебрецен, Кечкемет, Сегед) і базується на моделюванні, яке враховує зміну глобального горизонтального опромінення та середньорічної температури повітря.

Основні висновки роботи такі:

- Зростання річної продуктивності. У всіх сценаріях до середини та кінця століття спостерігається зростання виробництва електроенергії порівняно з базовим рівнем 2010 року. Найвищі темпи зростання продуктивності демонструє песимістичний сценарій (RCP 8.5), де збільшення радіації компенсує вплив зниження ефективності через підвищення температури.
- Різниця у сезонному виробництві. Виявлено, що розрив між літнім і зимовим виробництвом зростає, особливо у північних регіонах. Це пов'язано зі зменшенням кількості хмар у літній період та впливом підвищеної температури на ефективність систем.
- Річна варіація ефективності. Співвідношення між річною продуктивністю систем і річною варіацією радіації змінюється залежно від сценарію. У оптимістичному сценарії (RCP 2.6) це співвідношення перевищує 1, тоді як у менш песимістичному (RCP 4.5) і песимістичному (RCP 8.5) воно зменшується.
- Потенційні ризики для ефективності. Підвищення температури знижує продуктивність напівпровідникових матеріалів, а також скорочує термін служби модулів через інтенсивніше ультрафіолетове випромінювання. Зміни

клімату можуть також викликати екстремальні погодні явища (шторм, град), які пошкоджують системи та потребують вдосконалення конструкцій.

Рекомендації:

- Технологічні вдосконалення. Необхідно розробляти нові термостійкі матеріали та системи охолодження, які мінімізують втрати ефективності при високих температурах.
- Прогнозування кліматичних ризиків. Запропоновано впроваджувати адаптивні алгоритми прогнозування для управління змінним опроміненням та короткостроковими перехідними явищами, такими як хмарний покрив або сильний вітер.
- Поєднання з іншими джерелами енергії. Для підвищення надійності енергозабезпечення рекомендується інтегрувати сонячні системи з іншими відновлюваними джерелами, наприклад, вітровою енергією.
- Аналіз регіональних особливостей. Дослідження повинні враховувати локальні кліматичні умови, щоб краще розуміти специфіку впливу зміни клімату на різні географічні регіони.

У підсумку, стаття підкреслює важливість врахування кліматичних змін для довгострокового планування та оптимізації роботи фотоелектричних систем, а також наголошує на необхідності впровадження інновацій у галузі матеріалознавства, прогнозування та управління енергосистемами.

У статті [6] аналізується вплив епізодів сахарського пилу на точність прогнозів виробництва фотоелектричної енергії в Угорщині. Зокрема, досліджено, як пилові бурі, що переносяться з Сахари, впливають на формування хмар та, як наслідок, знижують точність короткострокових прогнозів потужності фотоелектричних (PV) систем.

Угорщина, як частина Центральної Європи, стала свідком значного збільшення кількості та інтенсивності сахарських пилових бур в останні роки, що зокрема проявилось у рекорді 2022 року, коли було зафіксовано 16 епізодів пилу. Автори статті звертають увагу на те, що основним фактором, який знижує точність прогнозів виробництва енергії, є не прямий вплив пилу на

зменшення освітленості, а його роль у формуванні високорівневих хмар, що, у свою чергу, впливає на фотоелектричне виробництво.

Кореляція між пилом і виробництвом енергії: У статті продемонстровано негативну кореляцію між кількістю сахарського пилу та виробництвом фотоелектричної енергії. Це означає, що більша кількість пилових бур призводить до значного зниження прогнозованої потужності фотоелектричних установок.

Вплив пилу на хмарність: Згідно з дослідженням, частинки пилу, потрапляючи в атмосферу, можуть виступати як ядрця для формування хмар, особливо для утворення високорівневих перистих хмар. Цей процес значно зменшує точність прогнозів на 24 години, адже прогнозні моделі не враховують вплив цих частинок на хмарність.

Недооцінка пилу в прогнозах: У статті відзначено, що в багатьох прогностичних моделях часто спостерігається недооцінка кількості та розміру частинок пилу, що транспортуються, а також спрощена їх параметризація. Це призводить до великих похибок у прогнозах.

Проблеми з моделями: Автори також зазначають, що моделі, які використовують дані з аерозольних кліматологічних баз, не є достатньо точними для реального прогнозування впливу пилу на виробництво енергії. Замість цього пропонується використовувати короткострокові прогнози, що базуються на фактичних спостереженнях пилу.

Необхідність удосконалення моделей: Важливим кроком для підвищення точності прогнозів є вдосконалення параметризації мінерального пилу в моделях прогнозу. Необхідно включити такі фактори, як розмір частинок, форма, мінералогія та кількість пилу, що транспортується.

Вплив кліматичних змін: Зміни клімату сприяють посиленню пилових бур, що може призвести до ще більших похибок у прогнозах у майбутньому. Збільшення кількості пилу в повітрі та зміна моделей транспортування можуть ускладнити роботу мережі, що призведе до збільшення витрат на стабільність енергосистеми.

Фінансові наслідки: Невірні прогнози можуть мати серйозні економічні наслідки. Наприклад, у 2021 році Угорщина заплатила штраф у розмірі 372 мільйонів євро за 2 ГВт встановленої потужності через неефективність прогнозів, і ці витрати можуть зрости з урахуванням подальшого збільшення потужності сонячних систем.

Рекомендації:

- Врахування різних характеристик пилу: Необхідно проводити глибші дослідження щодо різних характеристик пилу, таких як його мінералогія, розмір та форма частинок, щоб покращити моделі прогнозування.
- Інтеграція даних про пил у реальному часі: Замість використання аерозольних кліматологічних баз даних, важливо застосовувати дані, отримані в реальному часі, для коригування прогнозів.
- Адаптація до зміни клімату: Моделі прогнозування повинні бути адаптовані до зміни клімату, щоб врахувати нові патерни пилових бур та їх вплив на хмарність і сонячну генерацію енергії.

Загалом, робота підкреслює важливість врахування пилових бур як нового важливого фактору, що впливає на точність прогнозів виробництва фотоелектричної енергії. Врахування пилу в прогностичних моделях, а також удосконалення параметризації мінерального пилу можуть значно підвищити ефективність прогнозів і зменшити витрати, що виникають через неточність у плануванні енергопостачання.

У статті [7] аналізується енергопродуктивність фотоелектричних мікроустановок з використанням мікроінверторів, порівнюючи результати моделювання та вимірювань на прикладі Польщі. Особливу увагу приділено аналізу продуктивності енергії від 10 фотоелектричних панелей протягом одного року, зокрема в умовах Центральної Польщі. Стаття розглядає різницю у виробництві енергії між окремими панелями, що досягає до 3,8% на рік, що становить близько 37,3 кВт·год/кВт/рік.

Методологія моделювання та вимірювань: Для моделювання енергопродуктивності використовувався метод HDKR (Хея, Девіса, Ключера, Рейндла) на основі даних про сонячну інсоляцію.

Результати моделювання порівнювалися з реальними вимірюваннями енергопродуктивності 10 фотоелектричних панелей в умовах Польщі, зокрема у регіоні, де враховуються погодні умови та місцева інсоляція.

Різниця у виробництві енергії: Було зафіксовано розбіжності в енергопродуктивності між панелями, що можуть досягати до 3,8% на рік. Це свідчить про значний вплив факторів, таких як затінення, стан панелей та інші фактори, які впливають на ефективність роботи установки.

Продуктивність мікроінверторних систем: Встановлення мікроінверторів дозволяє уникнути зниження ефективності у випадку, якщо одна панель працює гірше за інші, через те, що кожна панель має окремий інвертор. Це сприяє кращому використанню доступної сонячної енергії та підвищенню загальної ефективності системи, порівняно з традиційними інверторами, де можливі значні втрати через зниження ефективності найбільш слабкої панелі.

Порівняння методів моделювання: Стаття підтверджує, що метод HOMER є ефективним для оцінки річного виробництва енергії в системах з мікроінверторами, оскільки різниця між теоретичними та практичними значеннями виявилася меншою за 2%, що є дуже хорошим результатом для такого типу моделювання (значення $rMBE = 0,018$).

Аналіз впливу затінення та економічний аналіз: Було проведено детальний аналіз впливу затінення на продуктивність окремих панелей. Затінення значно знижує продуктивність системи, особливо в випадку використання стандартних інверторів. Мікроінвертори дозволяють мінімізувати цей ефект, покращуючи загальну ефективність.

Економічний аналіз показав перевагу використання мікроінверторів у порівнянні зі стандартними інверторами для домашніх фотоелектричних установок, зокрема з точки зору підвищення ефективності та зниження витрат на обслуговування.

Висновки показують що:

- Ефективність мікроінверторних систем: Використання мікроінверторів у фотоелектричних установках дозволяє значно підвищити ефективність виробництва енергії, особливо в умовах часткового затінення чи нерівномірного розташування панелей.
- Прогнозування енергопродуктивності: Метод HOMER є надійним інструментом для прогнозування виробництва енергії, з високою точністю моделювання в порівнянні з реальними даними.
- Економічні переваги: Мікроінвертори показують економічну ефективність завдяки кращій адаптації до різних умов та можливості максимізувати виробництво енергії навіть у випадку проблем з окремими панелями.

Ці результати є важливими для проектування та оптимізації фотоелектричних установок, що використовуються в домашніх господарствах, зокрема в країнах Центральної та Східної Європи, таких як Польща.

У статті [8] досліджується вплив зміни клімату на відновлювані джерела енергії (ВДЕ), аналізуючи результати кількісних прогнозів для ключових технологій: сонячної, вітрової, гідроенергетики та інших. Основна увага зосереджена на географічних та технологічних аспектах впливу кліматичних змін, невизначеностях прогнозів, а також на економічних наслідках для галузі.

Основні висновки:

- Збільшення уваги до впливу клімату на ВДЕ: Гідроенергетика та енергія вітру є найбільш дослідженими напрямками. Значна кількість робіт з'явилася після 2015 року, що демонструє підвищений інтерес до цієї теми.

- Географічні та технологічні особливості:

Європа: Північ регіону може отримати позитивний вплив на виробництво енергії з вітру, води та біомаси. На півдні очікується зниження ефективності цих технологій, але сонячна енергетика може отримати позитивний вплив.

США: Результати досліджень неоднозначні, з великою варіацією залежно від регіону та технології.

Азія та Африка: У багатьох регіонах прогнозується збільшення гідроенергетичного потенціалу, тоді як сонячна та вітрова енергетика можуть мати суперечливі результати. В Африці потрібні додаткові дослідження.

- Невизначеності прогнозів: Використовуються різні кліматичні моделі (GCM, RCM), які можуть по-різному відображати місцеві умови. Залежність результатів від сценаріїв концентрації парникових газів. Недостатня кількість економічних оцінок, що враховують довгострокові ризики та ефекти.

- Економічні аспекти: Дослідження економічних наслідків обмежуються гідроенергетикою або глобальними оцінками. Наприклад, очікується, що витрати на електроенергетичну систему США зростуть на 14% (51 млрд доларів США) до 2050 року за відсутності заходів щодо пом'якшення змін.

- Рекомендації: Включення в дослідження більшої кількості змінних, включаючи економічні аспекти та заходи адаптації. Розгляд впливу розвитку одних технологій на інші та можливих конфліктів з іншими користувачами ресурсів (особливо для гідроенергетики). Використання цих прогнозів для розробки стратегій державної політики та приватного інвестування.

- Значення статті: Робота є важливим оглядом поточного стану досліджень у сфері впливу клімату на ВДЕ, висвітлює прогалини та перспективи для майбутніх досліджень. Вона пропонує цінні дані для урядів, науковців та інвесторів, допомагаючи приймати обґрунтовані рішення у довгостроковій перспективі.

У статті [9] досліджується вплив зміни клімату на потенціал фотоелектричної енергії (PV) і пов'язані з цим витрати у глобальному масштабі за різних кліматичних сценаріїв. Зокрема, автори оцінюють роль атмосферних аерозолів, змін температури, сонячної радіації та вибору PV-технологій у майбутньому теплішому кліматі.

У деяких регіонах (Європа, Східна Америка, Південна Азія) прогнозується збільшення потенціалу виробництва PV до 6% до середини століття і до 12% наприкінці, тоді як у інших регіонах (північна частина

Північної Америки, більша частина Азії та Австралія) переважає зниження через зменшення сонячної радіації та підвищення температури.

Атмосферні аерозолі, які раніше недооцінювалися, мають значний вплив на зміну сонячних ресурсів, зокрема в Східній Азії.

Високі температури особливо впливають на модулі з моно-Si, підкреслюючи важливість покращення терморегуляції цих панелей. У сценаріях з низькими викидами парникових газів вплив клімату мінімізується, що може забезпечити економію до 12 мільярдів доларів США щорічно.

У сценаріях SSP370 (високі викиди) і SSP585 (слабкий контроль за забрудненням) витрати на PV-установки зростають через зменшення виробництва енергії. У більш сприятливих сценаріях SSP126 (низькі викиди) витрати зменшуються.

Найвища різниця у витратах між SSP126 та SSP370 становить 12,4 мільярда доларів США на рік, що свідчить про значний вплив кліматичних змін на енергетичний сектор.

Висновки підкреслюють необхідність вдосконалення технологій PV для зменшення впливу температури, важливість заходів із зменшення забруднення повітря та економічної доцільності сценаріїв із низькими викидами для глобального енергетичного переходу.

В статті [10] аналізується поточний стан та перспективи розвитку фотоелектричних бізнес-моделей у Румунії. Автори використовують метод Delphi для збору даних від експертів галузі, щоб дослідити поточні практики компаній і очікування щодо майбутніх тенденцій. Основна увага приділяється ключовим елементам бізнес-моделей у фотоелектричній енергетиці, таким як джерела доходу, стратегічні партнерства та сегментація клієнтів.

Зроблено висновки, що найпоширеніші моделі включають:

1. Фотоелектричні станції, що належать компанії та продають енергію торговим організаціям.
2. Станції, що продають енергію місцевим операторам мережі.

У наступні п'ять років, за прогнозами, перша модель залишатиметься домінуючою через її гнучкість у переговорах та переваги у співпраці з торговими організаціями.

Також відзначено тенденції до розвитку малих систем на дахах через підтримку "зелених тарифів" та зростання автономних систем завдяки зниженню вартості технологій. Стратегічне партнерство, включаючи співпрацю з генеральними підрядниками, також визнано важливим для ефективного функціонування бізнесу.

Загалом, дослідження висвітлює, що розвиток фотоелектричного ринку в Румунії значною мірою залежить від законодавчого контексту, фінансових стимулів та адаптації до змін економічного та технологічного середовища.

В статті [11] аналізується вплив широкомасштабного впровадження вертикальних двосторонніх фотоелектричних систем на динаміку енергетичних ринків Європи. Дослідження розглядає, як інноваційні стратегії розгортання фотоелектричних систем, зокрема вертикальні двосторонні установки, можуть вирішити проблеми інтеграції сонячної енергії в електромережі, зменшити цінову нестабільність і підвищити економічну цінність виробництва енергії.

Зокрема, підкреслюється, що такі системи сприяють більш збалансованому виробництву електроенергії протягом доби, знижують пікові навантаження та забезпечують стабільніший ринковий профіль, що зменшує ризики від'ємних цін. Аналіз демонструє потенціал для покращення співвідношення генерації до попиту за рахунок збільшення часу виробництва у періоди високої потреби.

У дослідженні також розглядається можливість збільшення європейської потужності фотоелектричних систем до 720 ГВт до 2030 року, вказуючи на виклики модернізації застарілих електромереж. Розвиток вертикальних двосторонніх систем, агровольтаїки та інших інноваційних форматів розгортання дозволяє оптимізувати використання землі та підвищити ефективність енергетичної інфраструктури.

Ключовими висновками є те, що впровадження цих систем сприяє заміщенню викопного палива, покращенню транскордонної торгівлі електроенергією та зниженню витрат на інфраструктуру. Вертикальні двосторонні системи зменшують потребу в інвестиціях у мережу, одночасно забезпечуючи стабільне виробництво енергії протягом доби, що важливо для переходу до сталої енергетики.

У дослідженні [12] пропонується інноваційна інтегрована транспортно-фотовольтаїчна енергетична система, яка дозволить муніципалітету Помпеї розробити низку політик та інструментів міського екотуризму для підготовки та впровадження екологічно сталого плану мобільності, що буде застосовуватися у майбутньому міському плані.

Інноваційний характер дослідження полягає у двох основних аспектах:

1. Технології, що застосовуються: використання тонкоплівкових фотовольтаїчних (PV) панелей (елементи з міді-індію-галію-(ді)селеніду) на гнучкій основі.
2. Метод застосування: комбінований підхід до енергії та мобільності на основі стратегії «нульові кілометри та нульові викиди для електротранспорту з нульовими викидами», що реалізується в публічному міському плані (Piano Urbanistico Comunale) Помпеї.

У передбачуваний PV-системі, розташованій на 700 м² автостоянки, використано інноваційний дизайн із багатофункціональним підходом (дах із біоміметичним сонячним відстеженням).

Це забезпечить щорічне виробництво енергії обсягом 100 МВт·год із приростом потужності на 20-25% у порівнянні зі стандартними фіксованими PV-панелями такого ж типу.

Дослідження акцентує на швидкій зміні пріоритетів у туризмі, де природні, історичні та рекреаційні місця набувають більшого значення. Міста, що мають багату культурну спадщину, як-от Помпея, стикаються з подвійним викликом:

1. Захист міського середовища від деградації, одночасно з його покращенням.

2. У Помпеї тиск антропогенних факторів підсилюється великим туристичним потоком і міським розростанням, а також релігійними паломництвами до Святині Мадонни.

Екологічні вигоди проєкту:

1. Часткове закриття центру міста для автобусів зменшить на 1/6 викиди газів: 20 тонн CO₂, 0,2 тонни CO, 80 кг NO_x, 80 кг летких органічних сполук (VOC).
2. Зменшення шумового забруднення через обмеження важкого та приватного транспорту.

Проєкт демонструє можливість збалансування екологічних, культурних та соціально-економічних потреб. Нові електротранспортні системи сприятимуть економічному зростанню, підтримуючи дослідження і розробки, а також розширення інноваційних компаній.

Запропоновані інновації, включаючи використання гнучких фотовольтаїчних панелей із самостійним сонячним відстеженням, сприяють сталому розвитку, підвищуючи якість повітря, знижуючи трафік та забезпечуючи чисту енергію.

У статті [13] аналізується чутливість фотоелектричних станцій (ФЕС) до зсувів у Канвондо, Республіка Корея, з використанням моделі максимальної ентропії для оцінки зсувної схильності територій у 2006, 2013, 2019 і 2020 роках. Дослідження виявило, що частка ФЕС, розташованих у зонах високої схильності до зсувів (LSA), зросла з 3,2% у 2013 році до 10,6% у 2020 році. Також встановлено, що 45% регіонів, дозволених для встановлення ФЕС згідно з чинними правилами, підпадають під LSA.

Запропоновано заборонити будівництво ФЕС на територіях із дуже дрібним або глибоким ґрунтом, на ділянках із гарним дренажем, північним напрямком схилів, ухилом 10–30°, а також у хвойних лісах. Це спрямовано на зменшення ризиків від зсувів, які загрожують інфраструктурі, спричиняючи значні збитки.

Результати підкреслюють необхідність удосконалення регуляторних критеріїв, особливо з урахуванням зміни клімату, що збільшує інтенсивність

опадів і, відповідно, частоту зсувів. Запропонована структура багаторічного аналізу LS може бути корисною для інших регіонів із подібними умовами, наприклад, у Китаї та країнах ЄС, де багато ФЕС розташовано у гірських місцевостях.

У статті [14] розглядається явище підвищення хмарності (Cloud Enhancement, CE) та його вплив на роботу фотоелектричних установок різного масштабу. Основні висновки та аспекти аналізу такі:

1. Дослідження впливу CE на фотоелектричні генератори:

Аналізовано, як CE підвищує опромінення фотоелектричних панелей, що іноді перевищує номінальну потужність генераторів. Зокрема, для установок потужністю до 0,1 МВт середнє опромінення може бути в 1,5 рази вищим, ніж за умов ясного неба. У великих фотоелектричних генераторів мегаватного масштабу середнє опромінення зростає до 1,4 разів, проте частота подій CE зменшується зі збільшенням площі.

2. Механізми явища CE:

Явище пояснюється посиленням розсіюванням сонячного світла на краях хмар та високим альбедо поверхонь (сніг, вода, будівлі). Максимальні значення опромінення в CE досягали 2,0 кВт/м² у різних географічних умовах.

3. Експериментальний аналіз:

Для аналізу використовували масив піранометрів, що охоплював площу 1400 м², відповідну генератору потужністю 0,1 МВт. Дані дозволили оцінити середнє опромінення на площах різного розміру та частоту подій CE.

4. Виявлені просторово-часові характеристики CE:

Тривалість подій CE в основному становить від секунд до однієї хвилини, але найбільш потужні можуть тривати кілька хвилин. Зони CE мають типові діаметри декілька десятків метрів, що співмірно з розмірами малих фотоелектричних установок.

5. Результати моделювання та рекомендації:

Проведено моделювання руху хмарних тіней для оцінки середнього опромінення. Виявлено, що більші площі згладжують флуктуації освітленості.

Рекомендовано враховувати явище СЕ при проектуванні фотоелектричних систем та підборі інверторів для уникнення перевантаження.

Для малих установок (до 0,1 МВт) явище СЕ може суттєво впливати на роботу, підвищуючи вихідну потужність.

Установки більшого масштабу менше піддаються впливу СЕ через згладжування ефекту на великих площах, хоча події з сильним опроміненням все одно можуть призводити до перевищення номінальної потужності.

Зменшення частоти СЕ для великих систем дозволяє знизити ризики, проте вплив тривалих подій потребує адаптивних стратегій управління.

В статті [15] розглядається потенціал виробництва фотоелектричної енергії, пов'язаної з будівлею, в контексті Ініціативи ЄС щодо сонячних дахів. Декарбонізація будівельного сектору є ключовою для досягнення кліматичних цілей ЄС до 2050 року. Хоча нові політики підкреслюють важливість виробництва сонячної енергії на місці під час енергетичного переходу, дослідження щодо оцінки розриву між технічно можливим потенціалом і фактичним виробленням електроенергії PV панелями на дахах залишаються рідкісними. У цьому дослідженні застосовуються геопросторові методи та модель BISE високої роздільної здатності для оцінки основних просторових і часових характеристик потенціалу виробництва фотоелектричної енергії на дахах.

Згідно з результатами моделювання, технічний потенціал для виробництва фотоелектричної енергії на дахах у ЄС оцінюється приблизно в 2,7 ПВт·год, що відповідає рівню споживання електроенергії в ЄС. Найбільший фотоелектричний потенціал виявлено для Німеччини, Франції, Італії та Польщі, зі збільшенням на 30% до 2060 року. Наші висновки також підкреслюють, що, дотримуючись останніх політик, можна значно підвищити сонячну енергетичну продуктивність дахів у ЄС, до 2040 року, головним чином завдяки структурі та рівню енергоефективності майбутнього будівельного фонду.

На сьогодні в ЄС 40% загального споживання енергії та 33% викидів CO₂ пов'язані з будівельним сектором. Щоб виконати кліматичну стратегію ЄС, яка передбачає скорочення викидів парникових газів на 55% до 2030 року та досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року, необхідні амбітні заходи та енергоефективні рішення. Однією з найбільших можливостей є сонячна технологія, яка забезпечує високу щільність чистої енергії на місці як у просторі, так і в часі.

В ЄС домінуючим варіантом у сонячній енергетиці залишаються фотоелектричні (PV) панелі, які складають близько 80% від загальної встановленої потужності, в порівнянні з сонячними тепловими колекторами, які займають 20%. Це пояснюється коротшим терміном окупності PV панелей порівняно з сонячними колекторами в багатьох кліматичних умовах. Тому уряди часто надають перевагу цій технології у програмах підтримки енергетичного переходу.

Хоча останніми десятиліттями спостерігається значне зростання фотоелектричного сегмента дахів, близько 90% дахів європейських будівель залишаються не залученими з точки зору сонячної енергії. Це означає, що невикористаний потенціал у генеруванні чистої енергії є значним. В рамках Ініціативи ЄС щодо сонячних дахів, Європейська комісія (ЄК) встановила цілі для прискорення встановлення фотоелектричних систем на дахах, серед яких обов'язкове встановлення для всіх нових і існуючих громадських, комерційних і житлових будівель. Це ініціатива повинна призвести до збільшення виробництва електроенергії на 58 ТВт-год та додаткових 5 мільйонів фотоелектричних дахів до 2025 року.

На рівні країни найбільший фотоелектричний потенціал було виявлено для країн з високою доступністю дахів, таких як Німеччина та Франція, а не для країн з найвищим сонячним випромінюванням, як Іспанія чи Греція. Це пояснюється тим, що для цих країн із великою площею будівельний фонд є основним фактором оцінки. Найнижчий потенціал вироблення було

зафіксовано для країн з меншою забудовою та меншою відповідною площею дахів.

Також підкреслюється, що житлові будинки зроблять найбільший внесок у загальний технічний потенціал вироблення PV панелей, однак найбільше зростання буде спостерігатися для нежитлових будівель, як-от офіси та торгові точки. Результати моделювання демонструють, що в сукупності для всього ЄС і на річній основі сучасні фотоелектричні панелі теоретично можуть збалансувати попит на енергію, якщо вся відповідна площа даху буде інтегрована.

Незважаючи на ці результати, європейським країнам доведеться збільшити зусилля у швидкості встановлення фотоелектричних систем на дахах, що пов'язане з витратами на їх реалізацію, щоб досягти поставлених цілей. Модель показує, що майбутні темпи встановлення та типи будівельного фонду будуть ключовими для того, як швидко PV на дахах стане стандартом для будівель у ЄС.

У статті [16] розглядається потенціал сонячної фотоелектричної енергії для декарбонізації сектора електроенергії. Автори підкреслюють, що завдяки високій масштабованості та швидкому розгортанню сонячної фотоелектричної (SPV) енергії, вона є ідеальним кандидатом для прискореної декарбонізації електроенергетичного сектору. Однак основними бар'єрами для використання SPV є типові профілі виробництва сонячної енергії та інфраструктура традиційних електростанцій. Використання систем накопичення енергії (ESS), хоч і розглядається як критично важливе, має низку обмежень, таких як залежність від рідкоземельних елементів та високі витрати на енергію і викиди.

Стаття пропонує стратегічне взаємопов'язання сонячних фотоелектричних станцій (SPVPP) для подолання цих обмежень. Моделювання двох варіантів ліній електропередачі (ЛЕП) потужністю 12 ГВт показує, що такі мережі можуть забезпечувати постійну електроенергію навіть поза сонячними годинами, зменшуючи потребу в ESS та заміщуючи

інфраструктуру з високими викидами CO₂. Для випадку з поздовжньо розділеними лініями передачі, що з'єднують SPVPP, було продемонстровано, що цей підхід може значно знизити викиди вуглецю і зменшити витрати в порівнянні з традиційними рішеннями на основі ESS.

Крім того, автори розглядають нові технології, зокрема багатоконтактні мережі постійного струму надвисокої напруги, надпровідні кабелі та нові напівпровідникові матеріали для покращення ефективності і зменшення втрат під час передачі електричної енергії на великі відстані. Дослідження показує, що для досягнення кліматичних цілей до 2050 року необхідно розгорнути фотоелектричні потужності на рівні 90 ТВт, що може задовольнити значну частину світового попиту на енергію.

Зокрема, переваги великих, взаємопов'язаних фотоелектричних мереж для досягнення кліматичних цілей очевидні: такі системи можуть забезпечити глобальну енергетичну безпеку, зменшити залежність від викопних джерел енергії і створити нові можливості для економічного розвитку, особливо в слаборозвинутих регіонах. Водночас, для масштабного впровадження таких рішень необхідно сприяти розвитку технологій зберігання енергії та передачі на великі відстані, зокрема через підводні кабелі та гібридні технології передачі електроенергії.

Таким чином, стаття підкреслює важливість стратегічної інтеграції великих фотоелектричних систем у глобальні енергетичні мережі, що забезпечить досягнення кліматичних цілей та сприятиме декарбонізації енергетичного сектору.

В статті [17] аналізується ефективність експериментальної фотоелектричної системи з різними модульними технологіями в умовах помірного клімату Східної Польщі. Дослідження охоплює порівняння продуктивності сонячних модулів, що працюють на базі двох тонкоплівкових технологій (CdTe і CIGS) і полікристалічного кремнію (pc-Si) за 2015 рік. Номінальна потужність кожної системи складає приблизно 3,5 кВт для тонкоплівкових модулів і 17 кВт для pc-Si. У результаті вимірювань у

реальних зовнішніх умовах було виявлено, що всі види модулів мають нижчу ефективність, ніж заявлено виробниками, а технологія CIGS продемонструвала найкраще співвідношення виробленої енергії та продуктивності, також виявивши мінімальні втрати через температуру.

Автори дослідження також вказують на те, що ефективність фотоелектричних систем значною мірою залежить від температури та інтенсивності сонячного випромінювання, які змінюються залежно від пори року. Технологія CIGS виявила високу стійкість до підвищення температури, оскільки її температурний коефіцієнт потужності був нижчим за технічні дані, що підтвердило, що на сонячних електростанціях в умовах помірного клімату ця технологія є вигідною альтернативою більш традиційним системам на основі $pc-Si$.

Дослідження також показало, що усі типи модулів чутливі до впливу зовнішніх факторів, таких як вологість і пил, які можуть призводити до пошкоджень або гарячих точок, але вплив цих факторів на різні типи модулів має відмінності. Загалом дослідження підтвердило високу ефективність технології CIGS, що робить її перспективною для застосування в помірному кліматі.

В статті [18] аналізується метод картографування фотоелектричних станцій у Китаї за допомогою Landsat, моделі випадкового лісу (RF) та Google Earth Engine (GEE). Метою дослідження є створення карти фотоелектричних установок у Китаї до 2020 року та оцінка їх екологічних і соціальних впливів. Для класифікації фотоелектричних станцій застосовано піксельний підхід з використанням супутникових зображень з роздільною здатністю 30 м. Отримана карта показує, що площа фотоелектричних станцій становить 2917 км², більшість з яких розташовані на орних землях, з меншою кількістю на неродючих землях і луках.

Згідно з результатами, найбільше фотоелектричних установок знаходяться в таких провінціях, як Цинхай, Сінцзян та Внутрішня Монголія, що відповідає регіонам з високим потенціалом сонячної енергії. Порівняно з

2013 роком, встановлення фотоелектричних станцій спричинило зниження рослинного покриву в районах з високою природною рослинністю. Однак у посушливих районах, де рослинність була обмеженою, їхня поява сприяла покращенню екологічного індексу EVI.

Дослідження показало, що картографування за допомогою моделі RF дає точність понад 95%, при цьому модель показала добрі результати в ідентифікації фотоелектричних станцій, незважаючи на деякі помилки пропуску, пов'язані з різними умовами розташування та рельєфом місцевості. Водночас, система візуальної інтерпретації дозволила виправити помилки і покращити точність класифікації.

Отриманий набір даних про фотоелектричні станції є одним з найновіших та найповніших доступних ресурсів для вивчення розподілу таких установок у Китаї. Ці дані можуть бути використані для екологічної оцінки, управління політикою, а також для подальшого розвитку методів класифікації фотоелектричних установок.

У статті [19] аналізується застосування методу багатовпливових факторів (MIF) на основі географічної інформаційної системи (ГІС) для оптимального вибору місця сонячних фотоелектричних електростанцій у місті Нашик, Індія. За допомогою цього методу було враховано різні фактори, такі як сонячна радіація, швидкість вітру, температура поверхні землі, вологість, рослинність, висота над рівнем моря, землекористування, відстань від доріг та аспект місцевості.

Результати показали, що найбільш підходящі ділянки для встановлення сонячних електростанцій займають 32,34% досліджуваної території з "доброю" придатністю, а "дуже добре" придатні ділянки складають 17,95%. Аналіз чутливості показав, що сонячна радіація, вологість та висота над рівнем моря є найбільш впливовими факторами. Перевірка результатів на основі фактичних даних показала точність прогнозу на рівні 81,80%.

Це дослідження надає важливу інформацію для розробників політики та інших зацікавлених осіб, сприяючи ефективному плануванню та реалізації проектів сонячної енергетики в Індії.

У статті [20] аналізується техніко-економічна оптимізація вартості фотоелектричної електроенергії для високоширотних регіонів, зокрема для індивідуальних будинків. Розглядаються різні типи фотоелектричних систем та їх економічна ефективність, враховуючи змінні ціни на електроенергію та можливість самостійного споживання електрики. Автори порівнюють вертикальні двосторонні панелі (VBPV) з іншими типами, виявляючи, що вони показують на 7,4–10,9% вищу економічну цінність та збільшують загальну продуктивність на 9,1%. Однак, встановлення таких систем обмежено через необхідність великої площі для монтажу, що ускладнює їх застосування в міських умовах.

Розрахунки показують, що максимізація власного споживання електроенергії є найбільш економічно вигідною стратегією. Вартість виробленої фотоелектричної енергії залежить від рівня власного споживання та ринкових цін на електроенергію, особливо у кризові періоди, коли ціни на електрику можуть значно зрости, як це було у 2022 році.

Крім того, інвестиційна привабливість системи залежить від розміру та типу фотоелектричної установки. Для зниження вартості та покращення ефективності, важливо враховувати потенціал власного споживання і вплив ринку електроенергії, а також використовувати інноваційні рішення для інтеграції VBPV у міське середовище.

РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ПРОЕКТУ СОНЯЧНОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

2.1. Технологічні особливості та класифікація сонячних фотоелектричних систем

Питаннями техніко-економічної оцінки впровадження проектів сонячної електричної генерації займаються провідні вчені з усього світу. Активні дослідження сонячних фотовольтаїчних систем розвиваються не тільки в розрізі диверсифікації джерел вироблення електричної енергії, а й з огляду на зростання кількості досліджень і створення концепцій енергоефективних індивідуальних житлових будинків [21].

Сонячні фотовольтаїчні системи є одними з найперспективніших джерел відновлюваної енергії, що активно впроваджуються в енергетичну інфраструктуру як на рівні держав, так і в індивідуальному житловому секторі. Їх принцип дії базується на перетворенні сонячного випромінювання на електричну енергію за допомогою фотоелектричного ефекту, який виникає у спеціальних напівпровідникових матеріалах. Найбільш розповсюдженими є кремнієві сонячні елементи, які можуть бути виготовлені у формі монокристалічних, полікристалічних або аморфних панелей, кожен з яких має свої характеристики за ефективністю, довговічністю, температурною стабільністю та ціною.

Після генерації електроенергії у формі постійного струму, його необхідно перетворити у змінний струм, що відповідає стандартам електромережі, зокрема 220 В та 50 Гц в Україні. Це завдання виконує інвертор — ключовий елемент системи, який також часто має вбудовані функції моніторингу, безпеки та оптимізації генерації. Крім інвертора, до системи входять кабельні лінії, системи захисту, кріпильні конструкції, заземлення, засоби вимірювання (двонаправлений лічильник електроенергії), а в окремих випадках — акумуляторні батареї для зберігання енергії та контролери заряду.

Залежно від функціонального призначення та умов експлуатації, фотовольтаїчні системи поділяються на три основні типи: автономні (off-grid),

мережеві (on-grid) та гібридні. Автономні системи забезпечують електропостачання у віддалених районах, де відсутня централізована електромережа, і повністю залежать від акумуляторів. Мережеві системи, які найчастіше використовуються у містах і приватному секторі, підключені до загальної електромережі, дозволяють використовувати вироблену енергію на власні потреби, а надлишки — продавати постачальнику за «зеленим тарифом». Гібридні системи поєднують обидва підходи: вони працюють із мережею, але також мають акумулятори для резервного живлення у разі перебоїв з електропостачанням.

Переваги використання фотовольтаїчних систем є чисельними та багатоплановими. З технічної точки зору, вони забезпечують високу надійність, не мають рухомих частин, що мінімізує зношення і потребу в обслуговуванні. З економічної точки зору, інвестування у такі системи дозволяє суттєво знизити витрати на електроенергію, а при підключенні до «зеленого тарифу» — отримувати стабільний прибуток. Екологічна користь полягає у відсутності шкідливих викидів, таких як CO₂, SO₂ або оксиди азоту, які притаманні викопним видам палива, що сприяє зменшенню парникового ефекту і поліпшенню екологічної ситуації.

В умовах Київської області, яка характеризується помірно континентальним кліматом, річна інсоляція становить у середньому 1100–1300 кВт·год/м². Це створює сприятливі умови для застосування сонячних панелей у приватних домогосподарствах. Найкращий кут нахилу для монтажу панелей у цьому регіоні — 30–35°, а орієнтація на південь дозволяє максимально ефективно використовувати сонячну енергію протягом року. Варто також враховувати сезонні коливання інсоляції, з піком у літній період і найнижчими значеннями взимку, що доцільно компенсувати за рахунок акумуляторного резерву або комбінування з іншими джерелами енергії, зокрема теплогенерацією.

У контексті інтеграції з теплогенеруючим обладнанням, сонячні фотовольтаїчні системи можуть виступати ефективним джерелом живлення

для теплових насосів, електричних бойлерів, інфрачервоного опалення та інших систем, що працюють на електроенергії. Це забезпечує не лише електричну, але й теплову енергонезалежність домогосподарства, особливо в період опалювального сезону, що є критичним у північних та центральних регіонах України.

Загалом, впровадження фотовольтаїчних систем у приватному житловому секторі Київської області є перспективним напрямом сталого розвитку, що дозволяє забезпечити енергонезалежність, знизити вплив на довкілля, а також створює фінансові переваги завдяки можливості експорту надлишкової електроенергії в загальну мережу. Важливим аспектом є також можливість інтеграції з розумними системами управління енергією та автоматизованими контролерами, що дозволяє оптимізувати споживання, збільшити ефективність та підвищити загальний комфорт проживання у сучасному енергоефективному будинку.

2.2. Інноваційні підходи та енергетична ефективність проектів сонячних електростанцій

В роботах [22-23] вказується доцільність застосування локальних станцій сонячної електричної генерації в розрізі автономності споживача. В статтях [24-25] наводять аналіз роботи сонячної генерації в розрізі юридичних аспектів та державного регулювання. В статтях [26-27] оцінюється вплив проектних рішень на енергетичну ефективність загалом, що є ключовим для обґрунтування будівництва сонячної електростанції в рамках розробки комплексних проектних рішень. Дослідження [26] пояснюють можливості застосування органічних циклів для генерації електроенергії, що може бути корисним для побутових сонячних станцій.

Застосування органічних циклів для генерації електроенергії є одним із сучасних та перспективних напрямів розвитку низькотемпературної теплоенергетики, особливо в умовах децентралізованого енергопостачання. Органічний циклічний процес, зокрема органічний цикл Ренкіна (ORC –

Organic Rankine Cycle), ґрунтується на тому ж принципі, що й традиційний цикл Ренкіна з використанням водяної пари, однак як робоче тіло використовуються органічні рідини з низькою температурою кипіння, такі як ізобутан, пентан, толуол або фторовані вуглеводні. Це дозволяє ефективно перетворювати тепло з відносно низькою температурою (від 70 до 300 °С) у механічну та далі в електричну енергію.

Така технологія є особливо актуальною при використанні низькопотенційних джерел тепла, до яких належать геотермальна енергія, теплова енергія доквілля, теплота відпрацьованих газів промислових процесів, а також теплота, що утворюється внаслідок роботи сонячних колекторів чи біомасових установок. Органічні цикли відзначаються високою адаптивністю до змін температурного режиму, що робить їх надзвичайно ефективними у застосуванні з нестабільними джерелами тепла, такими як сонячна енергія у хмарні дні чи сезонні геотермальні коливання.

Основними компонентами органічного циклу є випарник, в якому робоча рідина випаровується за рахунок зовнішнього джерела тепла; турбіна або розширювальний двигун, де відбувається перетворення енергії пари у механічну роботу; конденсатор, в якому пар конденсується назад у рідину; та насос, що забезпечує циркуляцію робочого тіла по циклу. Вся система, як правило, замкнена, герметична і працює в автоматизованому режимі. Залежно від потужності та призначення, органічні цикли можуть бути виконані як у компактних модульних форматах для побутового чи малопотужного промислового використання, так і у вигляді великих стаціонарних установок.

Ефективність ORC-систем коливається в межах 10–20 % для низькотемпературних джерел і може перевищувати 25–30 % при роботі з високотемпературними теплоносіями. Попри відносно невисокий коефіцієнт корисної дії порівняно з традиційними паротурбінними установками, ORC має значну перевагу в тому, що дозволяє перетворювати так зване «викидне тепло» або «теплові залишки» в корисну електроенергію, що в іншому випадку просто розсіюється у доквіллі. Крім того, такі системи є малошумними, не

потребують води як робочого тіла, не створюють високого тиску, що спрощує конструкцію і знижує вимоги до безпеки.

У контексті індивідуального житлового будинку в Київській області, органічні цикли можуть бути застосовані в інтеграції з теплогенеруючим обладнанням, зокрема з пелетними або дров'яними котлами, які забезпечують постійне джерело тепла. За умови наявності правильно спроектованого теплообмінника та стабільної температури джерела, ORC-модулі можуть забезпечувати додаткову генерацію електроенергії, що дозволить не лише покрити власні потреби у споживанні, а й підвищити загальну енергоефективність будинку. Окрім того, такі системи можуть працювати в парі з сонячними тепловими колекторами — у денний час тепла енергія, отримана від сонця, накопичується в буферній ємності та використовується як джерело тепла для випаровування робочої рідини в ORC-циклі.

Сучасні розробки в цій галузі дозволяють створювати ORC-системи потужністю від кількох сотень ват до десятків мегават, залежно від потреб та джерела тепла. У приватному секторі особливу популярність набувають мікроустановки з потужністю 0.5–5 кВт, які можуть бути повністю інтегровані в існуючу систему енергозабезпечення будинку, працювати автономно або в режимі «паралель з мережею».

Отже, органічні цикли є ефективним та екологічно безпечним способом генерації електроенергії, який дозволяє ефективно використовувати теплову енергію низької температури, зменшити залежність від традиційної електромережі, а також підвищити загальну енергоефективність житлових будівель. У поєднанні з фотоелектричними системами та теплогенерацією, ORC-технології формують основу для створення енергонезалежного, сталого та високотехнологічного житлового середовища, що відповідає викликам сучасної енергетики.

Активні дослідження сонячних фотовольтаїчних систем розвиваються не тільки в розрізі диверсифікації джерел вироблення електричної енергії, а й з огляду на зростання кількості досліджень і створення концепцій

енергоефективних індивідуальних житлових будинків [21]. В роботах [21] вказується доцільність застосування локальних станцій сонячної електричної генерації в розрізі автономності споживача. В статтях [22] наводять аналіз роботи сонячної генерації в розрізі юридичних аспектів та державного регулювання. В статтях [21] оцінюється вплив проектних рішень на енергетичну ефективність загалом, що є ключовим для обґрунтування будівництва сонячної електростанції в рамках розробки комплексних проектних рішень. Дослідження [21] пояснюють можливості застосування органічних циклів для генерації електроенергії, що може бути корисним для побутових сонячних станцій.

В роботі [21] розглядаються перспективи використання різних джерел енергії, які можуть доповнити сонячні установки в умовах міста. Для оцінки річного вироблення електричної енергії були взяті дані щодо наявної сонячної радіації з досліджень [22].

В даному дослідженні зроблена спроба систематизувати дані щодо необхідних геометричних показників моделі побутової сонячної електростанції (СЕС) та визначити розміри капітальних вкладень такої системи. Варто зауважити, що максимальну потужність яку надають місцеві розподільні мережі та ДТЕК для побутової станції складає 30 кВт на одне домогосподарство.

Геометричні показники побутової сонячної електростанції визначаються як конструктивними особливостями встановленого обладнання, так і просторовими характеристиками місця монтажу. Одним з головних геометричних параметрів є площа, яку займають сонячні панелі на даху або на ґрунтовій поверхні. Залежно від потужності станції, типу модулів та ефективності інсоляції, розрахункова площа варіюється. Наприклад, для встановлення сонячної електростанції потужністю 10 кВт за використання монокристалічних кремнієвих панелей з середньою питомою потужністю 370–410 Вт на один модуль, необхідно близько 24–28 панелей, кожна з яких має типові габарити приблизно $1,7 \times 1$ м. Таким чином, загальна площа

розміщення становитиме приблизно 45–50 м², враховуючи міжмодульні зазори, технічні проходи та кут нахилу.

Кут нахилу панелей відносно горизонтальної поверхні є ще одним важливим геометричним параметром. У Київській області оптимальний кут становить від 30° до 35°, що забезпечує максимальне щорічне вироблення електроенергії. Для сезонної оптимізації деякі системи передбачають зміну кута нахилу вручну або автоматично, що дозволяє збільшити генерацію взимку або влітку залежно від потреб споживача. При монтажі на даху необхідно враховувати геометрію покрівлі, її нахил, несучу здатність та орієнтацію відносно сторін світу. Ідеальним вважається південне розташування з мінімальними затіненнями впродовж дня.

Також враховується відстань між рядами панелей, якщо встановлення здійснюється на відкритому просторі, що пов'язано з потребою уникнення взаємного затінення при низькому сонці, особливо у зимовий період. Стандартна відстань між рядами визначається за тригонометричною формулою з урахуванням кута нахилу і висоти модуля, а також географічної широти. Наприклад, для Київської області при куті нахилу 35° і висоті модуля 1 м оптимальна відстань між рядами становить близько 1,5–1,7 м.

Геометрія розміщення інверторного обладнання та кабельних трас також відіграє роль у проектуванні станції. Інвертор, як правило, розміщується у технічному приміщенні або на стіні житлового будинку, з дотриманням вимог щодо вентиляції, захисту від вологи та доступу до мережі. Довжина кабелів між панелями, інвертором та електрощитом впливає на електричні втрати, тому прокладка трас оптимізується відповідно до геометрії ділянки або будинку.

При розміщенні додаткового обладнання, зокрема акумуляторних блоків або буферних ємностей, необхідно враховувати не лише площу, а й об'ємні показники. Наприклад, для систем з накопиченням електроенергії об'ємом 10 кВт·год необхідне просторове розміщення батарей у безпечному, вентильованому і сухому приміщенні площею не менше 1,5–2 м².

Таким чином, геометричні параметри побутової сонячної електростанції є ключовими при її проектуванні, оскільки від правильного вибору площі, орієнтації, кута нахилу та розміщення елементів залежить як ефективність генерації, так і довговічність обладнання. В умовах приватного домогосподарства Київської області оптимальне використання наявного простору дозволяє забезпечити високий рівень енергонезалежності з мінімальними втратами енергії та високою окупністю системи.

В дослідженні спеціально приведені варіанти з потужностями, які перевищують цей рівень, з метою показати необхідність розширення таких рамок. В дослідженні прийнято, що потужність ФЕМ (фотоелектричних модулів) рівна потужності інвертора. За базовий ФЕМ прийнято Jinko Solar JKM585N-72HL4-V N-Type (TIER 1 2025 року). Проведено огляд виробників [22] та прийнято до аналізу інвертори китайського виробництва Deye, проте варто зауважити що в цій ціновій категорії присутні вже і європейські виробники (наприклад Victron Energy). При оцінці необхідної площі для розміщення розглядався варіант з пласкою покрівлею і кутом нахилу панелей на рівні 36 градусів. Нижче (табл. 1) наведені основні техніко-геометричні параметри деяких типорозмірів побутової СЕС.

Таблиця 1

Характерні площі для станцій різної потужності та приклад типового обладнання, що може бути застосоване

Потужність станції	Орієнтовна кількість ФЕМ, шт	Орієнтовна площа ФЕМ, м ²	Орієнтовна площа для розміщення, м ²	Приклад інвертора	Приклад акумулятора
12	21	50.1	81.9	Deye SUN-12K-SG04LP3-EU WiFi	2x Felicity LPBF48200-H (LiFePO4 51,2V 200Ah 10kWh)
25	43	102.5	167.7	Deye SUN-25K-SG01HP3-EU-AM2	2x LPBF48500 Felicity (LiFePO4 51,2V 500Ah 25,5kWh)

40	69	164.5	269.1	Deye SUN-40K-SG01HP3-EU-BM4	4x LPBF48500 Felicity (LiFePO4 51,2V 500Ah 25,5kWh)
100	171	407.6	666.9	2x Deye SUN-50K-SG01HP3-EU-BM3	8x LPBF48500 Felicity (LiFePO4 51,2V 500Ah 25,5kWh)

Тож варто зазначити, що до обсягу капітальних витрат потрібно додати і вартості вишукувальних робіт, до яких відносяться такі напрямки: аудит внутрішніх електричних мереж та обстеження стану несучих конструкцій. Також варто зауважити, що дозвільні процедури і відповідно введення в експлуатацію побутових сонячних електростанцій не відбувається згідно постанови КМУ №406 від 7 червня 2017 року зі змінами наказом №1094 від 24 вересня 2024 року). Нижче (табл. 2) наведено зведені дані щодо обсягу капітальних вкладень побутової СЕС.

Таблиця 2

Вартості основних елементів для певних типорозмірів станцій

Потужність станції	Вартість станції (ФЕМ+Інвертор+Акумулятор р+збірка обв'язки у складі систем додаткового захисту, в т.ч. пасивного блискавкозахисту), грн	Вартість каркасу (для варіанту плоскої покрівлі), грн	Вартість БМР, грн	Вартість вишукувальних робіт	Вартість проектно-вишукувальних робіт та експертизи проектно-документації грн
12	449650	37800	146235	70000	70000
25	767950	77400	253605	70000	90000
40	1384850	124200	452715	70000	120000
100	2981150	307800	986685	70000	150000

Енергетична ефективність та незалежність – є основним трендом розвитку багатьох інженерних і технічних галузей. Різноманітні дослідження

стосуються багатьох галузей науки і техніки, зокрема пасивного будівництва [23], модернізації існуючих інженерних мереж [23] та, звісно відновлювальної та нетрадиційної енергетики. Осередком в дослідженнях [23] знаходяться системи акумулювання енергії, зокрема акумулювання електричної енергії (зокрема від сонячної генерації) шляхом зміни типу енергії (перетворення електричної енергії в хімічну, теплову чи навіть потенціальну).

Системи акумулювання енергії є ключовим компонентом у сучасних енергоефективних системах, особливо у випадку використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна генерація, які характеризуються нестабільністю та циклічністю вироблення. Акумулювання енергії дозволяє зберігати надлишкову енергію, вироблену у періоди високої інсоляції, та використовувати її в моменти, коли сонячна активність є недостатньою або споживання перевищує генерацію. Одним із найефективніших підходів до акумулювання енергії є зміна її форми – тобто перетворення електричної енергії, що виробляється сонячними панелями, у хімічну, теплову або потенціальну.

Хімічне акумулювання електроенергії є найпоширенішим і здійснюється переважно за допомогою акумуляторних батарей. Найбільш розповсюджені технології включають літій-іонні, літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4), свинцево-кислотні, а також новітні варіанти, такі як натрій-іонні та твердотільні акумулятори. Літій-іонні акумулятори мають високу енергетичну щільність, довгий життєвий цикл та добру ефективність заряд/розряд (до 95%), що робить їх ідеальними для використання у побутових сонячних електростанціях. Ці системи дозволяють зберігати енергію на нічний час, забезпечувати резервне живлення або навіть стабілізувати навантаження в межах доби. Свинцево-кислотні акумулятори, хоча й менш ефективні, мають нижчу вартість і продовжують використовуватись у бюджетних проектах.

Другий метод — це акумулювання енергії у вигляді теплової. Такий підхід передбачає перетворення електричної енергії на теплову з подальшим зберіганням у теплоакумуляторах — спеціальних ємностях з водою, солями

або фазозмінними матеріалами. Наприклад, електричні тени можуть використовуватись для нагріву води в буферній ємності, яка далі застосовується для опалення будинку або постачання гарячої води. Перевага теплового акумуляування полягає у простоті конструкції, високому ступені ефективності (близько 90–95%) та здатності зменшити пікове навантаження на систему. Деякі сучасні рішення поєднують фотоелектричні системи з тепловими насосами та накопичувальними баками, створюючи ефективну інтегровану систему забезпечення побутових потреб.

Ще один перспективний, хоч і менш розповсюджений, варіант — акумуляування електроенергії у формі потенціальної енергії. Це реалізується шляхом підняття вантажу або рідини на певну висоту у період надлишкової генерації, а потім, при необхідності, опусканням цього вантажу з поверненням енергії через генератор. Подібний принцип лежить в основі гідроакумуляуючих електростанцій, однак для побутових умов використовуються мініатюрні рішення, як-от підвісні маси або системи на основі гравітаційних батарей. Попри їхню новизну, ці технології вже демонструють перспективу у сферах, де потрібна тривала стабільність і екологічна чистота.

Окрім того, у сфері новітніх розробок вивчаються системи акумуляування енергії у вигляді стисненого повітря, суперконденсаторів та гібридних комбінацій. Такі підходи можуть поєднувати в собі кілька видів збереження енергії, забезпечуючи як короткострокове покриття пікових навантажень (суперконденсатори), так і довгострокове зберігання (аккумулятори або тепло).

У побутових системах, інтегрованих із сонячними електростанціями, доцільним є комбінування щонайменше двох типів акумуляування: електричного — для забезпечення живлення побутової техніки, та теплового — для покриття потреб в опаленні та гарячому водопостачанні. Такий підхід дозволяє не лише оптимізувати споживання, а й досягти максимального коефіцієнта використання сонячної енергії в межах однієї домівки. Системи керування, що контролюють розподіл енергії між типами акумуляування,

автоматизуються за допомогою контролерів, які враховують поточну генерацію, рівень зарядженості, температурний режим та споживчі пріоритети.

Таким чином, акумулювання енергії в різних формах дозволяє ефективно адаптувати побутові енергосистеми до умов нестабільної генерації, створюючи основу для справжньої енергонезалежності домогосподарства. Завдяки сучасним технологіям користувачі мають можливість перетворити надлишкову енергію у зручну для зберігання форму та використовувати її з максимальною ефективністю.

Праці [23] описують загальні підходи на наводять методики оцінки техніко-економічних показників сонячних електростанцій. В цьому дослідженні було зроблено спробу систематизувати інформацію щодо досяжних термінів окупності при тарифах, які діють станом на початок 2025 року, зокрема при варіантах повного власного споживання або відпуску в мережу.

Нижче (табл. 3) наведені прості терміни окупності для двох варіантів побутової сонячної електричної станції: на гібридному та мережевому інверторах.

Побутова сонячна електрична станція є комплексом технічних засобів, призначених для генерації електроенергії з сонячного випромінювання з подальшим використанням її у межах приватного житлового будинку або продажем надлишків у зовнішню електромережу. Основною складовою такої системи, яка визначає її функціональну логіку та архітектуру, є інвертор — пристрій, що відповідає за перетворення постійного струму, згенерованого сонячними панелями, у змінний струм, сумісний з електромережею. У сучасних системах найпоширенішими є два типи інверторів: мережеві (on-grid) та гібридні (hybrid), кожен з яких має свої переваги, особливості функціонування та сфери застосування.

Мережева сонячна електростанція функціонує виключно у зв'язці з централізованою електромережею. Вона не передбачає акумулювання енергії,

а вся згенерована потужність або споживається в реальному часі у межах домогосподарства, або надлишки передаються до мережі, згідно з чинними правилами купівлі-продажу електроенергії, зокрема за «зеленим тарифом» або договорами Net Billing. Мережеві інвертори є ефективними, економічно доступними, мають високий ККД (до 97–98%) та не потребують складної обв'язки. Однак, при зникненні напруги у зовнішній мережі, навіть за наявності активного сонячного випромінювання, інвертор автоматично вимикається з міркувань безпеки, і система припиняє живлення.

Гібридна система є значно більш універсальною, оскільки вона поєднує функціонал мережевого інвертора з можливістю накопичення енергії у батареях. Така система здатна забезпечити автономне електропостачання навіть при відключенні зовнішньої мережі, працюючи у режимі резервного живлення. Гібридні інвертори керують як зарядом і розрядом акумуляторів, так і розподілом енергії між споживачами, мережею та накопичувачами, що дозволяє досягти максимальної енергетичної гнучкості та самозабезпечення. У денний час надлишкова енергія накопичується в батареях або продається у мережу, а в нічний час або під час пікових навантажень використовується для живлення будинку. Більшість сучасних гібридних інверторів також підтримують функції «розумного дому», автоматизоване керування навантаженнями, моніторинг через інтернет та адаптацію до динамічних тарифів.

З технічної точки зору, вибір між гібридною та мережею СЕС залежить від потреб користувача. Якщо головною метою є зниження рахунків та заробіток на продажі електроенергії, мережевий варіант буде доцільнішим завдяки нижчій вартості та простоті реалізації. Якщо ж основним є забезпечення енергетичної незалежності, особливо у регіонах з нестабільним електропостачанням або частими відключеннями, тоді доцільно обрати гібридну систему з акумуляторною підтримкою.

В умовах побутового сектору Київської області, де середня інсоляція становить близько 1100–1300 кВт·год/м² на рік, обидва типи інверторів здатні

забезпечити ефективну генерацію. Для станції потужністю 10 кВт це може означати річний виробіток близько 10–12 МВт·год, з яких до 70% може бути використано власним споживачем у гібридному варіанті, і до 100% може бути передано в мережу при мережевому підключенні. Правильний вибір і конфігурація системи залежить від енергоспоживчого профілю домогосподарства, тарифної політики, площі доступної для монтажу панелей та бюджету.

Таким чином, побутова сонячна електростанція як на мережевому, так і на гібридному інверторі забезпечує ефективну трансформацію сонячної енергії в електричну з можливістю покриття щоденних потреб домогосподарства, резервного живлення, а також участі у схемах енергетичного ринку. Інтеграція таких систем у сучасне житло сприяє зменшенню вуглецевого сліду, підвищенню енергетичної безпеки та формує нову філософію сталого побутового енергоспоживання.

Відповідно в розрахунках окупності прийнято, що в сценарії з гібридним інвертором – все споживання відбувається локально, а у випадку з мережевим – відповідно вся генерація передається в централізовану мережу (продаж всієї генерованої електричної енергії). Стосовно тарифів прийнятих в розрахунку: 31 травня 2024 року Кабінет Міністрів України затвердив зміни до положення про покладання спеціальних обов'язків (ПСО) на учасників ринку електроенергії, згідно з яким встановлюється єдина фіксована ціна для індивідуальних та колективних побутових споживачів на рівні 4,32 грн/кВт·год – з 1 червня 2024 року до 30 квітня 2025 року.

Передбачено, що на опалювальний сезон (у період з 01 жовтня по 30 квітня) діятиме пільговий тариф для індивідуальних та колективних побутових споживачів, які проживають в житлових будинках (у тому числі в житлових будинках готельного типу, квартирах), обладнаних в установленому порядку електроопалювальними установками за весь обсяг споживання електричної енергії на рівні: до 2000 спожитої електричної енергії на місяць –

2,64 грн/кВт·год, понад 2000 спожитої електричної енергії на місяць – 4,32 грн/кВт·год.

Стосовно вартості відпуску в мережу, то прийнято тариф на рівні 6.5 грн/кВт*год з ПДВ (податок на додану вартість). Консервативно в розрахунку розмір ПДВ виключений з величини тарифу.

Таблиця 3

Прості терміни окупності варіацій будівництва сонячних електростанцій на гібридному та мережевому інверторах

Потужність станції (потужність ФЕМ рівна потужності інвертора)	Сумарні капітальні вкладення (гібридний інвертор), грн	Сумарні капітальні вкладення (мережевий інвертор), грн	Питома вартість 1 кВт встановленої потужності (гібридний інвертор), грн/кВт	Консервативне значення річної генерації електричної енергії (для умов м. Києва), кВт*год	Простий термін окупності для системи з гібридним інвертором (власне споживання), років	Простий термін окупності для системи з гібридним інвертором (відпуск в мережу), років
12	77368 5	59492 0	64473 .8	1200 0	14. 9	9. 3
25	12589 55	95249 0	50358 .2	2500 0	11. 7	7. 1
40	21517 65	16005 00	53794 .1	4000 0	12. 5	7. 5
10 0	44956 35	33052 80	44956 .4	1000 00	10. 4	6. 2

Таким чином можна стверджувати про терміни окупності побутових сонячних систем електричної генерації на рівні 6-10 років для умов м. Києва для поточних тарифів і використанні відпуску в мережу, та відповідно 10-15 років для системи з виключно власним споживанням. Ці показники вірогідно будуть зменшуватися з огляду на тенденції до зростання вартості електричної енергії, зокрема і для населення.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ СИСТЕМИ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

3.1. Архітектура та основні компоненти системи сонячної генерації

Технічні рішення системи сонячної генерації у сучасному індивідуальному житловому секторі повинні відповідати вимогам ефективності, гнучкості, енергонезалежності та економічної доцільності. При проектуванні фотоелектричної станції з пріоритетом на продаж електроенергії до мережі, а також з можливістю забезпечення теплогенерації, важливо поєднати технологічні компоненти системи в одну узгоджену енергетичну архітектуру. Особливої актуальності такі рішення набувають у Київській області, де існує стабільний потенціал сонячної інсоляції на рівні 1100–1300 кВт·год/м² на рік та розвинена інфраструктура електропостачання.

На першому етапі проектування визначаються оптимальні параметри сонячної генерації — встановлена потужність, площа розміщення модулів, орієнтація та кут нахилу. З урахуванням середнього домогосподарства, типовою є установка системи потужністю 10–15 кВт. Така потужність забезпечує достатню генерацію для покриття власного споживання та продажу надлишків у мережу. Для досягнення максимальної ефективності застосовуються високоефективні монокристалічні панелі з питомою потужністю понад 400 Вт на модуль, встановлені на даху будинку або на наземній конструкції з фіксованим кутом нахилу 30–35°, орієнтовані на південь.

Центральною ланкою системи є інвертор — пристрій, який перетворює постійний струм у змінний та забезпечує розподіл енергії відповідно до заданих сценаріїв. В рамках даного проекту доцільно використати гібридний трифазний інвертор потужністю 12 кВт, зокрема Deye SUN-12K-SG04LP3-EU WiFi, який дозволяє як працювати з мережею у режимі продажу електроенергії, так і обслуговувати акумуляторну систему та резервне

живлення. Такий інвертор підтримує паралельну роботу з іншими пристроями, має два незалежні МРРТ-трекери, Wi-Fi-моніторинг, можливість підключення генератора та підтримує акумуляторні блоки на 48 В, що відповідає вимогам безпеки та довговічності системи.

До складу системи також входять акумуляторні батареї, які відіграють роль буфера між генерацією та споживанням. Їхнє використання особливо доцільне для забезпечення стабільного живлення теплогенеруючого обладнання (теплові насоси, електрокотли, інфрачервоне опалення), яке потребує постійної подачі енергії навіть у вечірній або нічний час. Для цього застосовуються літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) батареї з високою кількістю циклів та можливістю роботи у холодних умовах.

З урахуванням підключення теплогенеруючого обладнання, система повинна мати автоматизовану логіку розподілу енергії: у першу чергу — на побутові потреби, у другу — на акумуляцію, і тільки надлишки — на продаж. При цьому інвертор виконує роль центрального контролера, що оптимізує генерацію та споживання. Для опалення пропонується інтеграція буферної теплоакumuлюючої ємності, яка нагрівається в періоди активної сонячної генерації, з подальшим використанням тепла в нічний час або в моменти пікового навантаження. Такий підхід дозволяє поєднувати електричне й теплове акумулювання, що сприяє більш рівномірному розподілу енергії.

Не менш важливим є двонаправлений лічильник електроенергії, який фіксує як обсяги спожитої, так і відпущеної в мережу електроенергії, відповідно до нормативів та умов договору з оператором системи розподілу. Його дані використовуються для нарахування компенсації за «зеленою моделлю» або системою Net Billing.

Захист системи забезпечується комутаційним обладнанням — автоматами постійного струму, захистом від перенапруги, ізоляторами, а

також системами заземлення та грозозахисту. Усі компоненти об'єднані в щит керування, з можливістю віддаленого моніторингу та зміни параметрів.

Таким чином, технічні рішення системи сонячної генерації у рамках цього проєкту дозволяють ефективно використовувати сонячну енергію для побутового споживання, теплогенерації та продажу надлишків у мережу. Система є гнучкою, розширюваною, придатною для роботи в умовах українського клімату та відповідає сучасним вимогам до надійності, екологічності та енергетичної незалежності.

3.2. Інтелектуальні технології, безпека та перспективи розвитку сонячних систем

У контексті підвищення загальної ефективності системи сонячної генерації доцільно застосовувати систему енергоменеджменту (EMS — Energy Management System), яка автоматизовано керує розподілом енергії між споживанням, накопиченням, продажем у мережу та теплогенерацією. Інтелектуальний контролер на основі алгоритмів прогнозування інсоляції, температури, попереднього споживчого профілю та вартості електроенергії здатен самостійно оптимізувати використання енергії у режимі реального часу. Наприклад, в денний час система може направити генерацію на заряд акумуляторів і нагрів теплоакумулятора, а ввечері — забезпечити опалення та живлення будинку без залучення енергії з мережі.

Особливу увагу слід приділити вибору кабельно-провідникової продукції та монтажних компонентів. Використання кабелів з подвійною ізоляцією, стійкою до ультрафіолету та перепадів температур, забезпечує безпеку в умовах зовнішньої експлуатації. Контактні елементи мають бути виготовлені з матеріалів, що не піддаються корозії, з мінімальними електричними втратами. Уся система монтується згідно з нормативними вимогами ДБН та ПУЕ.

Також важливо врахувати пожежну безпеку системи, особливо в умовах розміщення в житловому секторі. Використання автоматів розмикання ланцюгів постійного струму (DC isolators), димових датчиків у щиті управління, дистанційного вимкнення живлення на випадок аварій — усе це підвищує безпечність системи. У більшості сучасних інверторів вже інтегровані функції захисту від зворотної полярності, короткого замикання, перегріву та перенапруг.

Щодо інтеграції теплогенерації, то сучасна практика передбачає підключення до фотоелектричної системи таких компонентів, як теплові насоси повітря-вода, електричні бойлери з ТЕНами, системи "тепла підлога", які працюють від накопиченої електроенергії. За допомогою програмованих реле або «розумних розеток» можна керувати їхньою роботою відповідно до наявності надлишкової енергії, наприклад: вмикати ТЕН лише тоді, коли сонячна генерація перевищує споживання будинку. Це дозволяє уникнути «втрат» енергії і водночас підвищує теплову ефективність будинку без залучення зовнішніх ресурсів.

Також варто зазначити можливість дистанційного моніторингу та керування всією системою через веб-інтерфейс або мобільний застосунок (наприклад, через платформи Solarman, Deye Cloud або аналогічні). Користувач отримує дані про генерацію, споживання, стан акумуляторів, історію роботи системи, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення або планувати технічне обслуговування.

У перспективі також доцільно передбачити можливість додавання нових компонентів — наприклад, зарядної станції для електромобіля (EV Charger), другого інвертора при розширенні СЕС або підключення додаткового резервного генератора. Така модульність дозволяє системі залишатися актуальною протягом десятків років.

Таким чином, правильне проектування та впровадження комплексних технічних рішень у системі сонячної генерації дозволяє не лише максимально ефективно використовувати відновлювану енергію, а й досягти автономності, безпеки, довговічності та високого рівня комфорту у побуті. Застосування інтегрованих підходів робить енергосистему не лише економічно вигідною, а й справді інноваційною частиною сучасного екологічного будинку.

Крім основних компонентів системи сонячної генерації, значну роль у її ефективності відіграє вибір та налаштування MPPT (Maximum Power Point Tracking) — трекерів максимальної потужності. Гібридні інвертори типу Deye SUN-12K мають два незалежних MPPT-входи, що дозволяє розміщувати частини масиву панелей з різною орієнтацією (наприклад, схід і захід) або на різних рівнях даху. Це дає змогу оптимізувати генерацію протягом усього дня, не обмежуючись лише піком сонячної активності. Така архітектура корисна в реальних умовах, коли доступна площа даху обмежена або має різну геометрію.

Ще одним важливим технічним рішенням є рівень напруги постійного струму у системі (DC-напруга). Для інверторів потужністю понад 10 кВт, як у випадку з Deye SUN-12K, вхідна напруга може сягати до 800 В, що дає змогу під'єднувати до 10–12 модулів послідовно в одному стрінгу, зменшуючи загальну довжину кабелів і втрати. Однак такі високі напруги потребують підвищеної уваги до електробезпеки, ізоляції та правильного вибору автоматики.

У системі також доцільно реалізувати механізм розумного відключення навантажень (load shedding) — коли при нестачі сонячної генерації або розряджених акумуляторах відбувається автоматичне вимкнення другорядних споживачів (наприклад, бойлера, електросушарки, розеток в підсобних приміщеннях). Це дозволяє зберігати критичне живлення (освітлення, холодильник, інтернет) навіть у несприятливих умовах.

Важливим є також питання термоджерування акумуляторними батареями, адже більшість літєвих систем не допускають зарядження при температурі нижче 0 °C. У побутових умовах батареїні блоки рекомендується встановлювати у буферному приміщенні або шафі з підігрівом та вентиляцією, які підтримують температуру у межах +5...+35 °C. Автоматичне терморегулювання може бути реалізоване на базі простих термореле з живленням від сонячної енергії.

Додатково до акумулювання в батареях і теплоакумуляторах можливе впровадження гідроакумуляції в опалювальній системі. Наприклад, надлишкова енергія може використовуватись для підвищення температури в буферній ємності об'ємом 500–1000 літрів, яка надалі забезпечує стабільну подачу тепла на кілька годин або навіть дїб.

З точки зору технічного обслуговування, рекомендується передбачити в системі інтерфейс для проведення самодіагностики та перегляду журналів помилок. Це дозволяє швидко локалізувати несправності, уникнути тривалих простоїв та зменшити витрати на обслуговування. Платформи на кшталт Deue Cloud або Solarman Smart забезпечують візуалізацію в режимі реального часу, архівування даних та повідомлення про критичні події на смартфон користувача або сервісної служби.

І нарешті, якщо розглядати перспективу на майбутнє, можна закласти в систему готовність до V2H (Vehicle to Home) або інтеграцію з електромобілем, який слугуватиме як додаткове джерело живлення. У недалекому майбутньому акумулятор електромобіля зможе стати буфером для дому на час відключення електроенергії, розширюючи функціональність системи ще більше.

Доцільно врахувати сезонну компенсацію продуктивності системи, яка передбачає використання динамічного керування кутом нахилу панелей (у разі

наземного монтажу) або ручне регулювання орієнтації двічі на рік — навесні та восени. Це дозволяє підвищити річну генерацію до 10–15% порівняно з фіксованими конструкціями. Такі конструкції можуть бути механічними (із замком-фіксатором) або навіть автоматичними (соляр-трекери), хоча останні мають вищу вартість і потребують обслуговування.

У разі недостатньої площі для розміщення всіх модулів під одним кутом доцільно реалізувати розподілену фотоелектричну систему, яка включає кілька сегментів генерації з окремими MPPT-входами. Наприклад, частина панелей орієнтована на схід — забезпечує ранкове живлення, інша — на південь, що дає пік вдень, а третя — на захід для вечірнього покриття навантаження. Це дозволяє "розтягнути" генерацію по часу та зменшити навантаження на акумулятор.

Щодо аварійного режиму, гібридна система повинна мати незалежний вихід для критичних споживачів (backup load), який працює навіть при повному відключенні мережі. Важливо завчасно передбачити окрему групу розеток або лінію живлення, яка під'єднана до цього виходу — наприклад, освітлення, холодильник, роутер. Усі ці пристрої можуть працювати автономно за рахунок батарей до 24–48 годин, що особливо важливо у випадках аварій або природних катастроф.

Необхідно також враховувати електромагнітну сумісність системи з іншими електроприладами в будинку — гібридні інвертори можуть створювати електромагнітні імпульси, особливо у фазі комутації або при запуску генератора. Для цього в електрощиті встановлюють фільтри ЕМС, обмежувачі перенапруги, а також заземлення з низьким опором (менше 4 Ом), яке забезпечує стабільну роботу усієї системи.

Особливу увагу слід приділити шумовим характеристикам обладнання — інвертори, особливо при активній вентиляції, можуть створювати фоновий

шум до 35–45 дБ. Тому при монтажі у житлових будинках або приміщеннях з постійним перебуванням людей бажано передбачити акустичне ізолювання інверторного відсіку або встановлення пристрою у технічному приміщенні.

Також доцільно передбачити резервні сценарії роботи системи — наприклад, інтеграцію дизельного або газового генератора, який вмикається автоматично у випадку повного розряду акумуляторів та відсутності сонячної генерації. Інвертор Deye SUN-12K має вбудовану функцію автоматичного запуску генератора, що дозволяє не лише забезпечити енергонезалежність, але й подовжити термін служби батарей, зменшуючи глибину їхнього розряду.

Останній аспект — майбутнє підключення до енергоспільнот або "віртуальних" електростанцій (VPP – Virtual Power Plant). У міру розвитку цифрової енергетики користувачі з власними СЕС зможуть об'єднуватися у хмарні енергомережі та продавати енергію не лише в загальну мережу, а й іншим споживачам. Система, описана в дипломі, має для цього відповідну базу: інтернет-зв'язок, цифровий лічильник, розумний інвертор і гнучку архітектуру.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ПОТУЖНІСТЮ 15 КВТ В КИЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

4.1. Методика проведення експериментальних досліджень та характеристика об'єкта

У межах дослідження енергоефективності та практичного застосування сонячної генерації в умовах помірно континентального клімату були проведені експериментальні спостереження за роботою фотоелектричної сонячної електростанції (СЕС) встановленою потужністю 15 кВт, розташованої в Київській області. Об'єкт дослідження — приватне домогосподарство, обладнане мережею монокристалічних фотомодулів потужністю 415 Вт кожен, з'єднаних у стрінги, що підключені до гібридного трифазного інвертора типу Deye SUN-15K-SG04LP3-EU. Станція функціонує в умовах часткового самоспоживання з можливістю продажу надлишкової електроенергії в загальну мережу згідно з договором Net Billing.



Рис. 1 – Експериментальний стенд.

Моніторинг станції проводився протягом одного календарного року з метою аналізу сезонних коливань генерації, ефективності системи акумулювання, впливу погодних умов на реальний виробіток, а також стабільності подачі електроенергії до споживачів і в зовнішню мережу. Використовувався цифровий двонаправлений лічильник, Wi-Fi-модуль моніторингу (Deye Cloud) та програмне забезпечення для візуалізації добових та місячних графіків.

Згідно з отриманими даними, річна генерація становила близько 16 800 кВт·год, що відповідає середньому показнику 1 120 кВт·год/кВт встановленої потужності за рік, що є типовим значенням для умов Київської області. Найвищий добовий виробіток фіксувався у червні — до 92 кВт·год на добу, тоді як мінімальні значення взимку — 6–10 кВт·год/день. Середньомісячна генерація у літні місяці (травень–серпень) становила понад 2 200–2 500 кВт·год.

Було встановлено, що ефективність перетворення сонячної енергії на електричну у системі досягала 17–19%, що є типовим для сучасних кремнієвих панелей. Додаткове падіння ККД (~3–4%) фіксувалось у періоди перегріву модулів (температура понад 60 °С на поверхні) або при накопиченні забруднень (пил, сніг, листя). Періодичне очищення панелей вручну дозволяло відновити генерацію на 5–8%.

У зимовий період особливу увагу було приділено накопиченню снігу на модулях. Було виявлено, що при куті нахилу 35° сніг частково самостійно сходить при плюсових температурах, проте при тривалих заморозках потребує ручного очищення. В умовах хмарного неба система все ж продовжує виробляти електроенергію — від 5 до 20% номіналу, що забезпечує базове освітлення, роботу холодильника, мережеве обладнання.

Оцінювалась також ефективність роботи акумуляторної підсистеми — LiFePO₄ батареї загальною ємністю 20 кВт·год дозволяли забезпечувати вечірнє та нічне споживання у середньому протягом 6–10 годин. У режимі аварійного живлення (повне відключення мережі) автономна робота критичних споживачів (освітлення, опалення, холодильник) досягала 12 годин при середньому навантаженні 1,2–1,5 кВт.

За результатами досліджень було підтверджено, що сонячна електрична станція потужністю 15 кВт є цілком життєздатним та економічно доцільним рішенням для індивідуального житлового сектору Київської області. Система забезпечує енергонезалежність, часткове покриття теплогенерації та генерує надлишкову енергію для продажу. Всі компоненти працювали стабільно, без збоїв або критичних помилок протягом року. Особливу ефективність система продемонструвала у міжсезоння (березень–квітень, вересень–жовтень), коли генерація достатня, а споживання енергії ще не надто високе.

РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА РОБОТУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

5.1. Кліматичні особливості експлуатації сонячних електростанцій у Київській області

В умовах глобальних кліматичних змін та зростаючої потреби у відновлюваних джерелах енергії, сонячна енергетика набуває все більшого значення і в Україні зокрема. Однак, експлуатація фотоелектричних станцій у регіонах з холодним кліматом, зокрема в Київській області, стикається з додатковими викликами. Одним з таких викликів є налипання снігу на поверхні фотоелектричних модулів, що може суттєво знижувати їх ефективність, а відповідно і генерацію електричної енергії.

Експлуатація фотоелектричних станцій у регіонах із холодним кліматом, таких як Київська область, пов'язана з низкою специфічних викликів, що впливають на ефективність генерації електроенергії, надійність обладнання та загальний термін його служби. Незважаючи на поширене уявлення, що сонячна генерація є ефективною виключно в регіонах із високою температурою та великою кількістю сонячних днів, досвід експлуатації у північних широтах свідчить про високу придатність фотоелектричних систем до умов помірно континентального клімату, за умови правильного проєктування та обслуговування.



Рис. 2 - Процес монтажу панелей на плоскій покрівлі.

Одним із основних викликів є зменшення тривалості світлового дня у зимовий період та наявність хмарності, що знижує інтенсивність сонячного випромінювання. У Київській області середня кількість сонячних годин на рік становить близько 1900–2000, однак узимку цей показник може падати до 1,5–2,5 годин на добу. Це призводить до зменшення генерації, що у поєднанні з підвищеним енергоспоживанням у холодну пору року створює потребу у використанні систем акумуляування або резервного живлення.

Ще одним важливим фактором є накопичення снігу та обмерзання поверхні сонячних панелей, що суттєво знижує їх пропускну здатність для

сонячного світла. Незважаючи на те, що фотомодулі мають певний самоочисний ефект при встановленні під кутом, практично завжди необхідне періодичне ручне або автоматизоване очищення. Сніг не лише блокує світло, але й може створювати нерівномірне навантаження, що в перспективі впливає на механічну цілісність кріплень або рам. Особливо важливим є якісне кріплення до дахів, здатне витримати снігове навантаження до 100–150 кг/м², відповідно до нормативів регіону.

Температурний режим також впливає на роботу сонячних елементів. Цікаво, що при низьких температурах ефективність перетворення сонячного світла у електроенергію зростає, оскільки фотоелементи працюють краще в охолодженому стані, знижуючи втрати на нагрів. Проте тривалий вплив мінусових температур на конструкційні елементи системи — кабелі, інвертори, акумулятори — потребує застосування морозостійких матеріалів, термоізоляції, а в деяких випадках і обігріву певних частин системи (наприклад, акумуляторних блоків у буферних приміщеннях).

Також важливим є питання утворення інею або конденсату при різких перепадах температур, що може спричинити короточасні збої або погіршення електричних контактів. Для запобігання цьому використовуються герметичні з'єднання, система вентиляції інверторів, а також температурні датчики, що дають змогу автоматично реагувати на зміни кліматичних умов.

Крім того, морозостійкість елементів системи — зокрема акумуляторів — є критичним чинником. Літій-іонні батареї при температурах нижче 0 °С значно втрачають свою здатність до заряджання та розряджання, тому в умовах зими доцільно передбачити їхнє розміщення у теплому приміщенні або застосування систем підігріву. Це ж стосується контролерів, які повинні бути встановлені у сухих, опалюваних приміщеннях із температурним режимом не нижче 5 °С.

З огляду на зазначені особливості, проектування та експлуатація побутових сонячних електростанцій у Київській області потребує врахування низки кліматичних викликів. Проте при грамотному технічному підході — з

урахуванням геометрії встановлення панелей, використанням морозостійких матеріалів, правильною системою керування та очищенням — такі станції демонструють високу надійність і ефективність навіть у холодний період. Додатковою перевагою є можливість використання комбінованих систем, які включають акумуляування енергії або резервне теплогенеруюче обладнання, що дозволяє досягти стабільного електрозабезпечення незалежно від сезонних змін.

5.2. Експериментальні дослідження впливу снігового покриву та метеоумов на роботу ФЕС

Дана стаття присвячена експериментальному дослідженню роботи фотоелектричних модулів в умовах налипання снігу на прикладі електричної станції в місті Буча Київської області. Метою дослідження є оцінка впливу снігового покриву на продуктивність сонячних панелей та розробка рекомендацій щодо оптимізації їх роботи в зимовий період. Результати цього дослідження мають важливе практичне значення для проектування та експлуатації сонячних електростанцій в регіонах з подібними кліматичними умовами.

Дослідження вітчизняних вчених [25] вказують на ключову особливість фотоелектричних систем (ФЕС) – мінливість генерації електроенергії в розрізі кута нахилу панелей відносно горизонту. В працях [25] тематика підвищення ефективності сонячної енергетики розкривається більш широко і якісно аналізуються загальні тренди. Загалом же мінливість електричної генерації зумовлена кількома факторами: часткове або повне затінення фотоелектричних модулів (ФЕМ); атмосферні явища, зокрема скупчення водяної пари та дрібних твердих частинок; добовий рух Сонця небосхилом (а також зміни сезонного кута падіння сонячних променів через зміну аналеми).

Для подолання цих викликів і забезпечення достатньої потужності, інженери застосовують два основні підходи. Першим з них є встановлення надлишкової потужності ФЕМ шляхами збільшення площі поверхні для

сприйняття сонячної енергії та оптимізації кута нахилу ФЕМ для максимізації середньодобового надходження енергії. Другим підходом є використання систем наведення ФЕМ, в тому числі забезпеченням постійного перпендикулярного кута падіння сонячних променів на поверхню ФЕМ [25].

Методи [25] дозволяють підвищити ефективність ФЕС та стабілізувати вироблення електроенергії, незважаючи на природні обмеження.

Роботи [25] найбільш близькі до теми даного дослідження, і розкривають питання впливу снігу та відмінних від снігу твердих частинок на роботу сонячних електричних станцій. В цих дослідженнях розглядається вплив снігу та льодяної корки, як системи затінення. Розглядаються оптичні властивості снігу та льоду. Узагальнюються різні аспекти експлуатації в країнах, в яких в зимовий період випадає велика кількість опадів. Систематизуються методи, які дозволяють зменшувати вплив снігу та льоду на роботу сонячних електростанцій.

В даному дослідженні проведено аналіз впливу метеорологічних умов (в частині налипання снігу на ФЕМ) на кількісні показники ФЕС, зокрема вироблення електричної енергії.

З листопада 2024 року проводився моніторинг з подальшим аналізом отриманих даних двох сонячних електричних станцій в Київській області (розташовані на висоті 130 м над рівнем моря на широті 50°33'). В даному дослідженні подаються результати та аналіз моніторингу за грудень 2024 року станції №1 (рис. 1) з такими характеристиками: інвертор трифазний потужністю 12 кВт Deye SUN-12K-SG04LP3-EU WiFi, акумулятор Felicity LPBF48200-H (LiFePO4 51,2V 200Ah 10kWh), поле ФЕМ Jinko Solar JKM585N-72HL4-V N-Type у кількості 22 одиниці (рис. 2) загальною площею 52.4 м². ФЕМ розміщені під кутом 38 градусів до горизонту.

Гібридний трифазний інвертор **Deye SUN-12K-SG04LP3-EU WiFi** потужністю 12 кВт — це високотехнологічне рішення для побудови ефективних сонячних електростанцій у приватних будинках та малих комерційних об'єктах. Його функціональність дозволяє працювати як у

мережевому, так і в автономному режимах, забезпечуючи гнучкість та надійність енергопостачання.

Ключові технічні характеристики:

- Номінальна потужність: 12 кВт
- Тип інвертора: гібридний, трифазний
- Вихідна напруга: 220/380 В або 230/400 В (3L/N/PE)
- Кількість МРРТ: 2 незалежні трекери
- Діапазон вхідної напруги PV: 160–800 В
- Підтримка акумуляторів: літієві та свинцево-кислотні, напруга 40–60 В
- Максимальна зарядна/розрядна потужність: 12 кВт
- Можливість паралельного підключення: до 10 інверторів
- Додаткові функції: Wi-Fi моніторинг, підтримка генератора, клас захисту IP65, робоча температура від -45°C до $+60^{\circ}\text{C}$

Переваги використання:

- Гнучкість у налаштуваннях: можливість пріоритетного використання сонячної енергії, акумуляторів або мережі
- Підтримка резервного живлення: забезпечення безперебійного енергопостачання під час відключень електромережі
- Моніторинг та керування: зручний інтерфейс для віддаленого контролю та налаштувань через Wi-Fi
- Можливість масштабування: паралельне підключення декількох інверторів для збільшення загальної потужності системи

Інвертор Deye SUN-12K-SG04LP3-EU WiFi є ідеальним вибором для тих, хто прагне до енергонезалежності та ефективного використання відновлюваних джерел енергії. Його технічні характеристики та функціональні можливості дозволяють реалізувати складні енергетичні проекти з високим рівнем надійності та ефективності.

Акумулятор **Felicity LPBF48200-H** є сучасним накопичувачем енергії на основі літій-залізо-фосфатної хімії (LiFePO_4), що забезпечує високу надійність, ефективність та довговічність при використанні в системах домашньої фотоелектричної генерації. Його номінальна напруга становить 51,2 В, а ємність – 200 А·год, що відповідає близько 10 кВт·год накопиченої енергії. Такий обсяг дозволяє забезпечити безперебійну роботу енергетичних систем у приватному житловому будинку протягом пікових вечірніх або нічних годин, коли сонячна генерація відсутня. В умовах гібридної або автономної енергосистеми цей акумулятор відіграє ключову роль у балансуванні виробництва та споживання енергії, дозволяючи не лише зменшити залежність від зовнішньої мережі, але й ефективно керувати теплогенеруючим обладнанням.

Акумуляторна батарея Felicity LPBF48200-H має тривалий ресурс служби – понад 6000 циклів заряд-розряд при глибині розряду до 80%, що забезпечує 10–15 років експлуатації без істотного зниження ємності. Це особливо важливо в контексті довготривалого використання в енергосистемі приватного будинку з фотоелектричними панелями, де щоденне циклування є нормою. Завдяки високому коефіцієнту корисної дії (понад 95%) в процесі заряджання та розряджання, втрати енергії мінімізуються, що позитивно впливає на загальну ефективність системи. Стабільність роботи при різних температурах (від -20°C до $+55^{\circ}\text{C}$) робить його придатним для встановлення в умовах клімату Київської області, де температура повітря може суттєво коливатися протягом року.

Однією з найважливіших переваг цієї акумуляторної батареї є її сумісність із сучасними гібридними інверторами, які використовуються у фотоелектричних системах. Через інтерфейси типу RS485 або CAN акумулятор може взаємодіяти з системою керування, що дозволяє інтегрувати його в складні енергетичні архітектури із застосуванням розумного розподілу

навантаження, віддаленого моніторингу, автоматизації режимів роботи та підтримки алгоритмів оптимізації енергоспоживання. Така гнучкість дозволяє реалізовувати сценарії роботи системи з пріоритетом продажу електроенергії в мережу, коли спочатку задовольняється споживання будинку, надлишки йдуть на заряд акумулятора, а решта — на продаж через механізм «зеленого тарифу» або Net Metering.

В умовах приватного житлового будинку, де встановлено теплогенеруюче обладнання, таке як електричні ТЕНи, теплові насоси чи електрокотли, акумулятор відіграє роль буфера енергії, дозволяючи не лише зменшити пікові навантаження на мережу, але й забезпечити автономність у випадку відсутності зовнішнього електропостачання. Наприклад, протягом дня сонячна станція генерує енергію, яка спочатку спрямовується на покриття поточних потреб будинку, потім — на заряд акумулятора. У вечірні години, коли зростає потреба в обігріві або нагріванні води, але сонячна генерація вже відсутня, енергія використовується з акумулятора, зменшуючи необхідність у споживанні електроенергії з мережі. Таким чином, Felicity LPBF48200-Н дозволяє ефективно використовувати надлишки генерації для забезпечення теплового комфорту, не втрачаючи можливість продавати надлишкову енергію в денний час.

Завдяки тому, що LiFePO_4 акумулятори є одним із найстабільніших і найнадійніших типів літійових батарей, вони забезпечують високий рівень безпеки експлуатації. Вбудована система керування батареєю (BMS) контролює всі параметри її роботи, запобігаючи перенавантаженню, короткому замиканню, перегріву та іншим потенційним аваріям. Це важливо у житловому секторі, де стабільність та безпечність обладнання є пріоритетом.

Для реалізації стратегії «пріоритету продажу» важливо, щоб акумулятор не знижував можливість заробітку від продажу енергії. У такому режимі акумулятор налаштовується на заряд лише після того, як енергія була

максимально спрямована в мережу, або ж навпаки – він може працювати у режимі компенсації нічного тарифу, тобто заряджатися вночі з мережі, а розряджатися вдень для зменшення споживання, якщо тарифна модель це дозволяє. Це відкриває можливість оптимізації споживання електроенергії не лише з точки зору енергонезалежності, а й з точки зору економічної доцільності.

Усе це робить акумулятор Felicity LPBF48200-H незамінним компонентом для сучасної децентралізованої енергосистеми приватного будинку в Київській області, де пріоритетом є як продаж електроенергії в мережу, так і забезпечення теплового комфорту завдяки використанню електроопалення або інших форм теплогенерації. Його застосування не лише підвищує ефективність роботи всієї системи, але й забезпечує гнучкість, стабільність та безпеку функціонування домашньої енергетичної інфраструктури.

Сонячні модулі Jinko Solar JKM585N-72HL4-V, які є представниками сучасної високоефективної лінійки N-Туре, демонструють одні з найкращих характеристик серед фотоелектричних модулів, доступних на ринку для приватних та комерційних сонячних станцій. У рамках проєкту домашньої фотоелектричної системи з пріоритетом продажу в мережу та підключенням теплогенеруючого обладнання, обрана конфігурація з 22 панелей цього типу дозволяє досягти високого рівня генерації електроенергії навіть за умов обмеженого дахового простору або змінного рівня інсоляції, притаманного Київській області.

Кожен модуль має пікову потужність 585 Вт, тож сумарна встановлена потужність фотоелектричного поля становить 12,87 кВт, що є достатнім не лише для забезпечення потреб житлового будинку, а й для формування відчутного надлишку енергії з можливістю її продажу до загальної електромережі. Це відкриває шлях до реалізації концепції «енергонезалежного

дому» або навіть «енергетичного бізнесу» в умовах децентралізованої генерації, коли власник домогосподарства може заробляти на виробленій електроенергії, компенсуючи початкові інвестиції в систему.

Загальна площа встановлення модулів становить 52,4 м², що є типовим для такої потужності, з урахуванням міжпанельних зазорів та відстані між рядами у разі монтажу на даховій поверхні або наземній конструкції. Така щільність встановлення дозволяє ефективно використовувати простір даху приватного будинку або допоміжних будівель, зберігаючи при цьому доступ до обладнання для обслуговування та можливість встановлення додаткових елементів системи (наприклад, вентиляції, систем зрошення, охолодження, тощо).

Панелі Jinko Solar JKM585N-72HL4-V виконані за технологією N-Type, яка на відміну від традиційних P-Type модулів, забезпечує вищу ефективність перетворення світла в електричну енергію, особливо в умовах часткового затінення, похмурої погоди або низького рівня освітлення, що є характерним для осінньо-зимового періоду в середній кліматичній зоні України. N-Type осередки мають нижчий коефіцієнт деградації, тож річна втрата потужності панелей є меншою, а довготривалий ресурс служби — вищим. За заявами виробника, ці модулі зберігають понад 87% від початкової потужності навіть через 30 років експлуатації, що дозволяє прогнозовано планувати окупність проєкту в довгостроковій перспективі.

Ще однією важливою перевагою є використання технології Half-Cut Cell (розрізані навпіл фотоелементи), що зменшує внутрішні втрати енергії та нагрівання модулів, підвищуючи загальну продуктивність системи. Це забезпечує більш стабільну генерацію протягом дня, навіть у разі часткового затінення нижньої частини модуля (наприклад, від снігу чи листя), оскільки модуль структурно поділений на дві незалежні частини. В умовах розсіяного сонячного світла така конструкція виявляється значно ефективнішою порівняно з традиційними повнорозмірними осередками.

Встановлення 22 модулів дозволяє забезпечити баланс між потужністю системи, її економічною ефективністю та просторовими обмеженнями ділянки або покрівлі. Така кількість панелей у поєднанні з відповідним інвертором і акумуляторною батареєю формує повноцінну гібридну енергетичну систему, здатну не лише забезпечити повний спектр потреб будинку, а й інтегруватися у мережу з пріоритетом продажу надлишків. При цьому важливо зазначити, що завдяки високій ефективності кожного модуля (близько 21,5–22%), система в цілому забезпечує стабільне виробництво навіть за умов часткової хмарності чи низької сонячної активності, що є типовим для холодної пори року.

Таким чином, сонячне поле, сформоване з панелей Jinko Solar JKM585N-72HL4-V, слугує надійною основою всієї енергетичної інфраструктури приватного будинку. Воно забезпечує основне джерело енергії для живлення споживачів, заряду акумуляторів, роботи теплогенеруючого обладнання та реалізації надлишків у зовнішню мережу. Завдяки сучасним технологіям, довгому строку служби та стабільності параметрів, ці модулі дозволяють максимально ефективно реалізувати ідею енергонезалежного та економічно доцільного житлового об'єкта, з урахуванням особливостей регіону, кліматичних умов та побутових потреб.

Орієнтація всього поля – суворо на південь. Перший ряд ФЕМ виконано в якості навісу та відповідно пасивного сонцезахисту південно орієнтованих кімнат другого поверху. Наступні три ряди ФЕМ розташовані з кроком 1800 мм та розміщені на відмітці покрівлі. Відпуск надлишкової енергії відбувається в зовнішню електричну мережу: налаштування станції базуються на пріоритеті продажу, заряд акумуляторів підтримується 100%. Таким чином ФЕС постійно працює в максимально можливому режимі відпуску – тобто перетворює всю доступну енергію сонця в електричну, що нівелює можливі неточності вимірів (наприклад зміни потужності при мінливості величини підключеного навантаження).

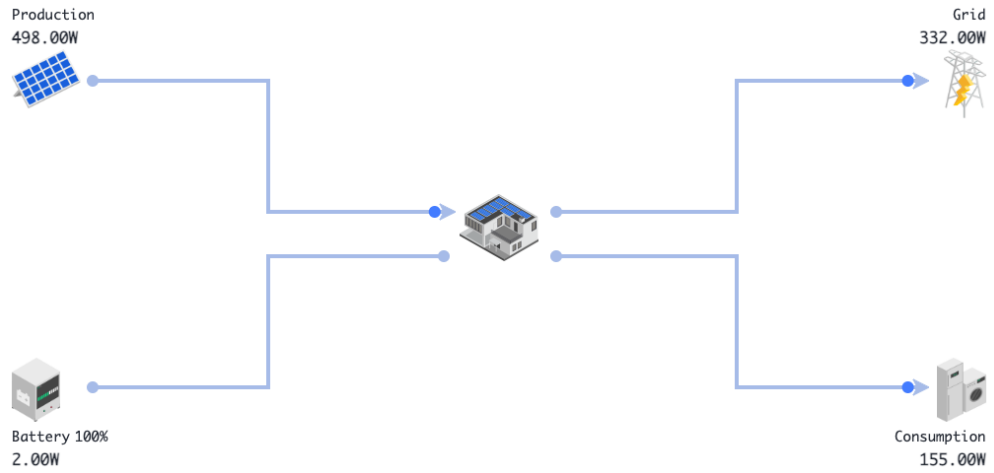


Рис. 3. Загальна схема системи генерації, споживання та відпуску
об'єкту дослідження (потужності ілюстративні в моменті на 13.50 6.01.2025

р.)

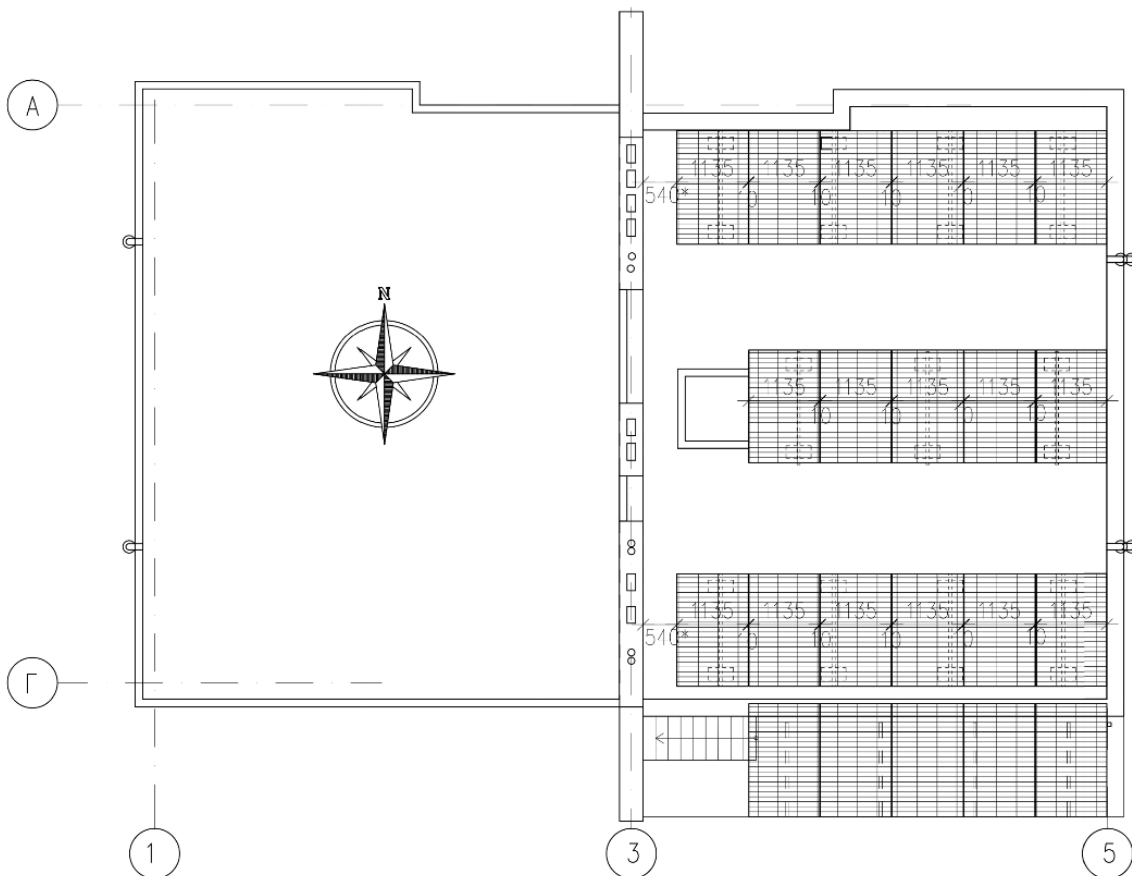


Рис. 4. Схема розміщення ФЕМ на плоскій покрівлі зблокованого
житлового будинку садибного типу

Висота сонця в зеніті (кут між лінією горизонту і положенням сонця на небі в момент зеніту, вимірюваний у градусах) в період проведення моніторингу складала від $+15^{\circ}59'26''$ (на 21.12.2024) до $+17^{\circ}31'31''$ (на 01.12.2024).

З огляду на схему орієнтації досліджуваної ФЕС (рис. 3) станція в період проведення експерименту працювала виключно на розсіяній сонячній радіації, що в умовах фактичної відсутності сонячних днів дозволяє з достатньою достовірністю дослідити вплив снігового покриву на роботу станції.

Наявність снігового покриву фіксувалася візуально та вимірювалася кожного дня о 12.00. Таблиця сформованих даних скомпільована з даними сервісу Метеопост (meteorpost.com) і наведена нижче (табл. 1).

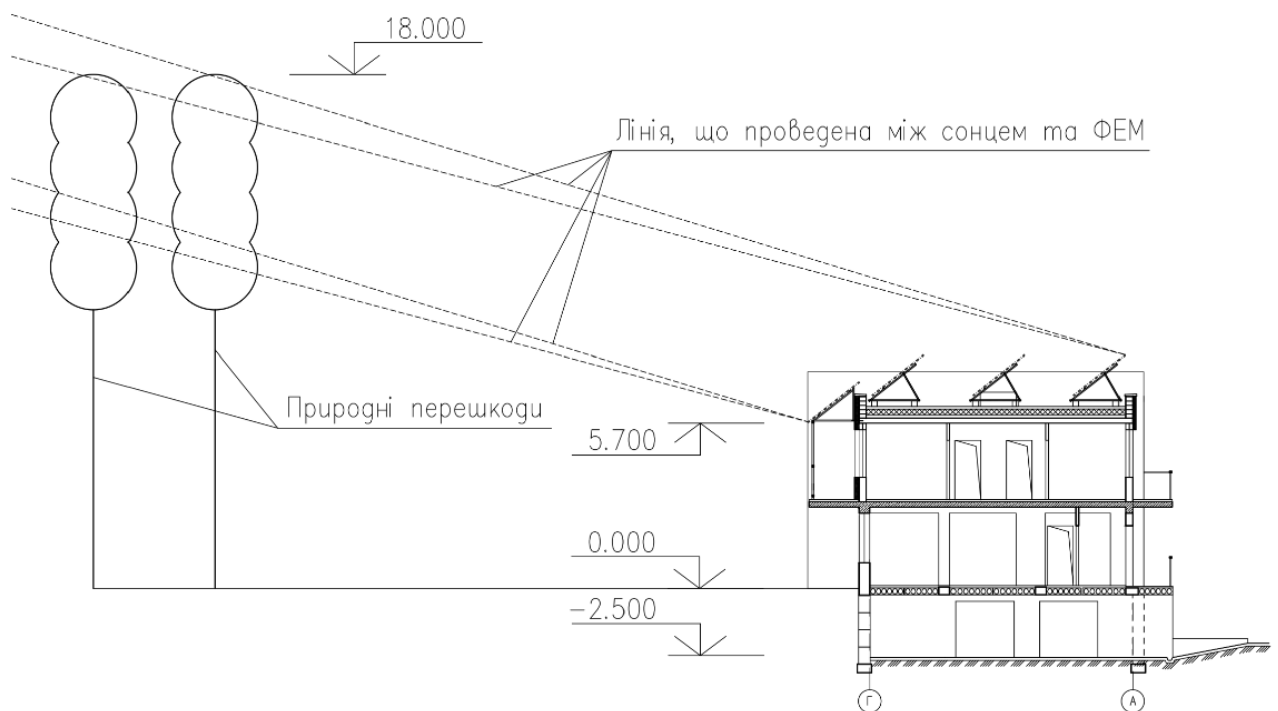


Рис. 5. Кути між положенням сонця (згідно фактичної висоти) та крайніми елементами ФЕМ

Сервіс Метеопост (www.meteorpost.com) є одним із провідних українських онлайн-ресурсів для отримання високоточної метеорологічної інформації, який спеціалізується на наданні даних про погодні умови, а також сонячну та вітрову активність для потреб енергетики, сільського господарства,

будівництва та інших галузей. У контексті проектування та експлуатації фотоелектричної станції в приватному житловому будинку, особливо з пріоритетом продажу електроенергії в мережу, сервіс Метеопост відіграє ключову роль у плануванні, розрахунках продуктивності системи та оптимізації її роботи протягом року.

Одна з найцінніших функцій, яку надає meteorpost.com, — це історичні та прогнозовані дані інсоляції, зокрема річна кількість сонячної енергії (ГВт·год/м²) для конкретного географічного регіону, включно з населеними пунктами Київської області. Така інформація дозволяє інженерам та проєктантам точно моделювати майбутню генерацію електроенергії від фотоелектричної установки, враховуючи сезонні коливання, хмарність, температуру, тривалість світлового дня та інші важливі фактори. Наприклад, при проєктуванні сонячної станції у Білій Церкві або Вишгороді можна отримати точну середньорічну суму глобальної сонячної радіації на горизонтальну площину та ухил, а також оцінити очікувану продуктивність кожного модуля та системи в цілому.

Для користувачів, що займаються альтернативною енергетикою, meteorpost.com також надає доступ до кліматичних розрахунків, які дозволяють змоделювати річну продуктивність фотоелектричних станцій із врахуванням технічних параметрів панелей, кута нахилу, орієнтації, типу інвертора, системи кріплення тощо. Це є надзвичайно важливим у процесі розрахунку економічної ефективності системи, а також при прийнятті рішень про розміщення панелей, кут нахилу та оптимізацію конструктивних рішень для максимальної генерації.

Окрім потужного функціоналу з точки зору сонячної енергетики, сервіс дозволяє отримувати детальні погодні прогнози з високою часовою роздільністю (по годинах), включаючи параметри, що безпосередньо впливають на ефективність ПЕС — температуру повітря, хмарність, опади, вітер, вологість тощо. Це дає можливість не лише аналізувати минулі періоди, але й оперативно реагувати на погодні умови при обслуговуванні станції чи в

процесі керування навантаженням — наприклад, автоматично перемикає живлення теплогенеруючого обладнання на живлення від акумуляторів або з мережі у випадку прогнозованої низької генерації внаслідок похмурої погоди.

Метеопост має як безкоштовну частину, доступну для звичайних користувачів (де можна побачити базову інформацію по регіону), так і платні професійні пакети, які дають доступ до розширених функцій — таких як енергетичні звіти, 3D-моделювання потенціалу установки, погодні карти, інтеграція з програмами моделювання енергетичних систем, включно з PV*SOL, PVSyst та іншими.

Таким чином, використання сервісу meteorpost.com у дипломному проєкті є цілком обґрунтованим і науково виваженим рішенням, що дозволяє підвищити точність розрахунків, забезпечити достовірне прогнозування продуктивності фотоелектричної системи та створити модель, максимально адаптовану до реальних кліматичних умов конкретного регіону. Це сприяє як енергетичній, так і економічній ефективності реалізованої системи, особливо у випадках, коли частина енергії спрямовується на живлення теплогенераторів або на продаж у загальну мережу.

Нижче (рис. 6) ілюстративно наведено зміни напруги в плинні доби на двох стрінгах сонячної електростанції, сумарної та одиничної потужності. Графік показує таку особливість сонячної генерації, як вихід на режим формування напруги з подальшою зміною сили струму, як чинника, що впливає на величину виробленої потужності.

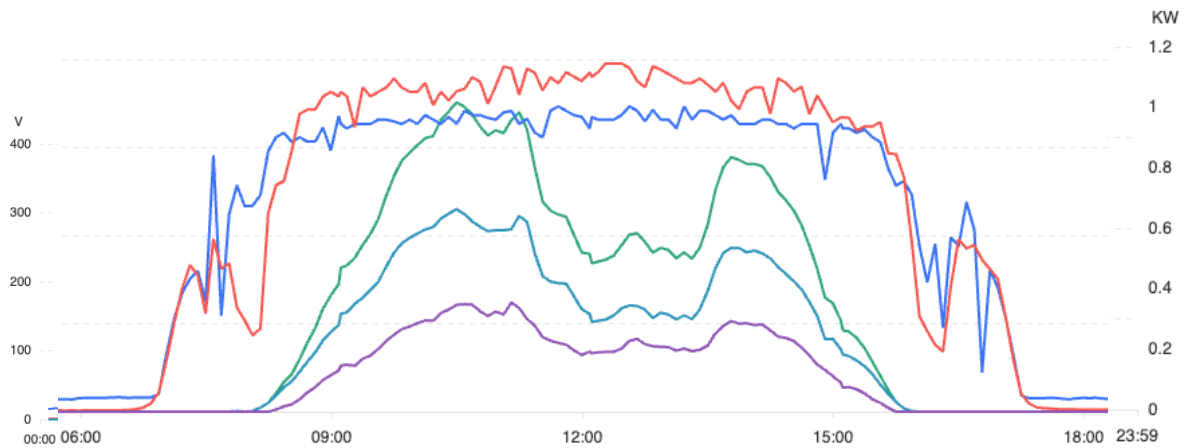


Рис. 6. Приклад змін напруги в плинні доби на двох стрінгах сонячної електростанції (синя та червона криві), сумарної та одиничної потужності (зелена, бірюзова та фіолетова криві, фактичні дані за 01.01.2025 р.)

kWh

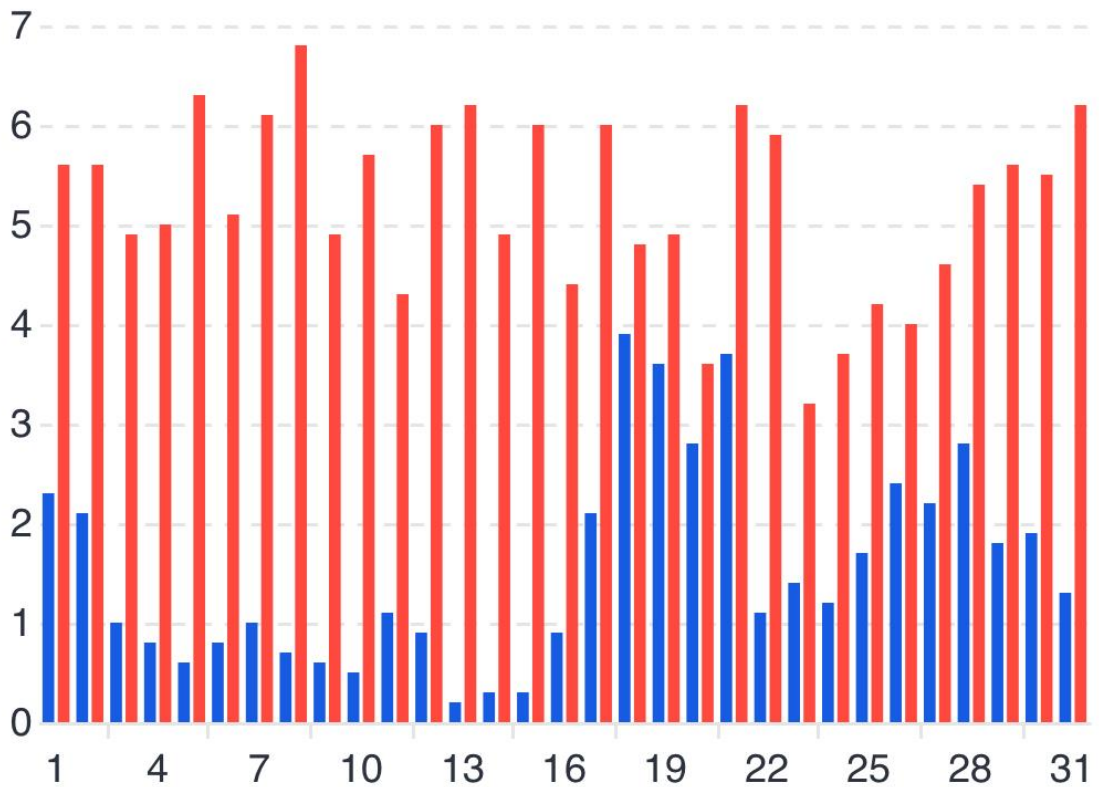


Рис. 7. Зміна добової генерації (сині стовпчики) в умовах налипання снігу на ФЕМ (червоні стовпчики – ілюстративні і представляють споживання електричної енергії будівлею об'єкту дослідження)

Таблиця 4

Стан поверхні панелей по дням (приклад для 13 грудня 2024 р.),
товщина снігу на початок дня: горизонтальна поверхня – 40 мм, поверхня
ФЕМ (38°) – 5 мм

Час	Висота хмар	Хмарн.	Швидк. вітру	Темп. пов.	Опад	Явища погоди	Сніг
2:00	50..100 m	8	2 м/с	-0.1°		серпанок	
5:00	50..100 m	8	2 м/с	-0.2°		дощ слабкий, що замерзає	
8:00	100..200 m	8	3 м/с	-0.2°	2 мм	дощ слабкий, що замерзає	рівномірний сніг, 100% землі
11:00	100..200 m	8	3 м/с	+0.1°		мряка слабка безперервна	
14:00	100..200 m	8	5 м/с	+0.2°		мряка слабка безперервна	
17:00	100..200 m	8	4 м/с	+0.1°		мряка або снігові зерна	
20:00	100..200 m	8	4 м/с	-0.4°	2 мм	серпанок	
23:00	300..600 m	7	3 м/с	-1.4°			

сформовано з [24] даних натурних спостережень

Таблиця 5

Приклад масиву даних, зібраних автоматизованою системою архівування показників роботи сонячної електростанції

Updated Time	Production Power(W)	Consumption Power(W)	Grid Power(W)	Purchasing Power(W)
2024/12/30 08:05:00	0.00	160.00	164.00	164.00
2024/12/30 08:10:00	0.00	153.00	354.00	354.00
2024/12/30 08:15:00	0.00	168.00	178.00	178.00
2024/12/30 08:20:00	0.00	187.00	311.00	311.00
2024/12/30 08:25:00	0.00	194.00	194.00	194.00
2024/12/30 08:30:00	3.00	168.00	264.00	264.00
2024/12/30 08:35:00	5.00	148.00	153.00	153.00

2024/12/30 08:40:00	12.00	187.00	689.00	689.00
2024/12/30 08:50:00	24.00	169.00	185.00	185.00
2024/12/30 08:55:00	62.00	163.00	155.00	155.00
2024/12/30 09:00:00	94.00	199.00	138.00	138.00
2024/12/30 09:05:00	89.00	123.00	66.00	66.00
2024/12/30 09:10:00	146.00	186.00	68.00	68.00
2024/12/30 09:15:00	189.00	152.00	-21.00	0.00
2024/12/30 09:20:00	180.00	159.00	-1.00	0.00

сформовано з особистого кабінету [24]

Аналіз пакету метеоданих та зміни генерації електричної енергії дає підставу говорити про зменшення рівня генерації на 60-70% при налипанні снігу на ФЕМ. Особливою проблемою виявилось утворення кірки льоду на краях панелей, що затримувало гравітаційне сходження снігу (обумовлене малими амплітудами коливань температури в діапазонах близьких до температур танення).

Можна систематизувати рекомендації для зменшення впливу метеорологічних чинників (зокрема снігового шару) на рівень електричної генерації:

1. Оптимізація кута нахилу панелей: встановлення панелей під кутом 40-45 градусів для регіонів з подібним кліматом та/або використання регульованих кріплень для сезонної зміни кута нахилу.
2. Застосування спеціальних покриттів: нанесення гідрофобних покриттів для зменшення адгезії снігу або використання самоочисних покриттів, що сприяють сповзанню снігу.
3. Впровадження систем активного очищення: встановлення автоматизованих систем очищення (щітки, вібраційні пристрої) або

використання систем підігріву країв панелей для запобігання утворенню крижаної кірки.

4. Оптимізація розташування панелей: врахування напрямку переважаючих вітрів при встановленні та забезпечення достатнього простору між рядами для природного сходження снігу.
5. Регулярне обслуговування: проведення планових оглядів та очищень панелей та навчання персоналу методам безпечного видалення снігу.
6. Модифікація конструкції (тільки для певних особливих умов, наприклад розміщення ФЕС на землі): використання рамок з підвищеними краями для утримання снігу від сповзання на нижні ряди та встановлення снігозатримувачів над панелями для контролю сходу снігу.
7. Моніторинг та прогнозування: впровадження систем моніторингу продуктивності в реальному часі та використання метеопрогнозів для планування профілактичних заходів.
8. Застосування інноваційних матеріалів: використання панелей з поверхнею, що відштовхує сніг та експериментування з новими типами скла та захисних покриттів.
9. Оптимізація дизайну системи: встановлення додаткових панелей для компенсації зимових втрат та використання гібридних систем з іншими джерелами енергії.
10. Застосування аеродинамічних рішень: проектування конструкцій, що спрямовують потік вітру для природного очищення панелей та використання вітрозахисних екранів для зменшення накопичення снігу.

Очевидно, що економічна привабливість запропонованих заходів потребує детального вивчення і обґрунтування, але загалом дослідження показує на значне пригнічення властивостей генерації ФЕС, яка знаходиться під дією метеорологічних чинників, зокрема снігового покриву.

РОЗДІЛ 6. КОМБІНОВАНА РОБОТА ТЕПЛООВОГО НАСОСУ НА СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

6.1. Уточнена модель генерації електричної енергії з СЕС

Питання енергетичної ефективності і, зокрема, будівель з енергоспоживанням, що наближається до нуля, є особливо актуальним в умовах зростання вартості викопного палива та енергії, отриманої з такого палива. Крім цього, особливо гостро постає питання енергетичної незалежності та відмовостійкості, особливо в умовах типових сьогоднішню геополітичних та соціальних викликів. Сучасні індивідуальні житлові пасивні будинки також розвиваються і в напрямку власної генерації енергії, що дозволяє таким будівлям бути енергонезалежними [25, 26].

В багатьох сучасних вітчизняних дослідженнях [27, 28] аналізується енергоефективність комбінованих систем опалення на базі теплових насосів для приватних житлових будинків під кліматичні умови України з оцінкою сезонних втрат енергії та потенціалу інтеграції відновлюваних джерел, включаючи сонячні електростанції (СЕС) для електроживлення теплових насосів. А в статті [29] аналізується енергетична продуктивність двоступеневих теплових насосів (ТН) на основі емпіричних досліджень садибних будинків в Європі з фокусом на оптимальні коефіцієнти перетворення (COP) та зменшення споживання електроенергії від мережі, але не робиться акцент на побутових СЕС як основному джерелі електрики для ТН в помірно континентальному кліматі з урахуванням локальної сонячної радіації.

Авторами в дослідженнях [29-31] аналізується техніко-економічна ефективність комбінованих систем ТН і СЕС для об'єктів в різних країнах світу з оцінкою інвестиційних витрат та енергетичного балансу, але не розглядаються індивідуальні садибні будинки, особливо в розрізі досяжної електричної генерації СЕС.

Окремої уваги заслуговує стаття [32], в якій авторами аналізується інноваційна концепція, яка дозволяє використовувати надлишкову енергію від СЕС, з техніко-економічним аналізом та оптимізацією для потреб опалення. При цьому авторами не робиться акцент на інтеграції з тепловими насосами в системах теплопостачання індивідуальних будинків. У статті аналізується поширення теплових насосів в низьковуглецевій енергетиці України з використанням моделі TIMES-Ukraine, з оцінкою потенціалу для зменшення викидів; проте не робиться акцент на використанні побутових PV-станцій як основного джерела електрики для ТН в індивідуальних садибних будинках, з комп'ютерним моделюванням сонячної генерації в Scilab для Київської області, як це робиться в даному дослідженні.

Об'єктом даного дослідження є комплекс інженерних систем: система теплопостачання на базі ТН «повітря-вода» і фотовольтаїчна електрична станція в якості джерела електропостачання, яка живить електричною енергією ТН. Система інженерного забезпечення, яка аналізується в якості емпіричного прикладу, функціонує в садибному житловому будинку, який розміщений в с. Гостомель Бучанського району Київської області.

В даному дослідженні для апробації роботи комп'ютерної моделі використовуються експериментальні дані, прийняті за результатами моніторингу постійно працюючої побутової сонячної електростанції за 2025 рік (з січня по серпень) з наступними технічними компонентами: інвертор трифазний потужністю 12 кВт Deye SUN-12K-SG04LP3-EU WiFi, акумулятор Felicity LPBF48200-H (LiFePO₄ 51,2V 200Ah 10kWh), поле фотоелектричних модулів (ФЕМ) Jinko Solar JKM585N-72HL4-V N-Type у кількості 23 одиниці загальною площею 54.8 м². ФЕМ розміщені під кутом 38 градусів до горизонту (рисунок 1). Орієнтація всього поля – суворо на південь. Перший ряд ФЕМ виконано в якості навісу над балконом та відповідно для пасивного сонцезахисту південно орієнтованих кімнат другого поверху. Наступні три ряди ФЕМ розташовані з кроком 1800 мм та розміщені на відмітці покрівлі. Відпуск надлишкової енергії відбувається в зовнішню електричну мережу:

налаштування станції базуються на пріоритеті продажу, заряд акумуляторів підтримується на рівні 100%. Таким чином, ФЕС постійно працює в максимально можливому режимі відпуску – тобто перетворює всю доступну енергію сонця в електричну, що нівелює можливі неточності вимірів (наприклад, зміни потужності при мінливості величини підключеного навантаження).

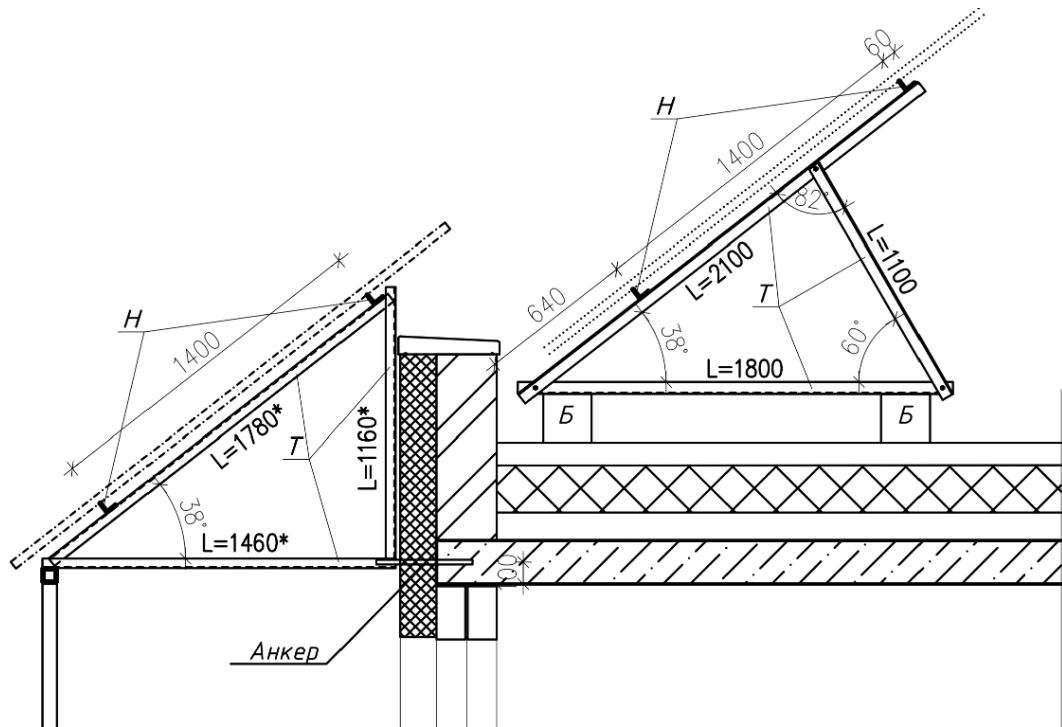


Рисунок 1. Розміщення ФЕМ на даху будинку з характерними геометричними розмірами та елементами кріплення (фрагмент робочого проєкту)

Для розробки моделі руху Сонця по небу в умовах Києва (широта $\varphi \approx 50.45^\circ$ N, довгота $\lambda \approx 30.52^\circ$ E), яка дозволить розрахувати рівень сонячної радіації на фотовольтаїчний (ФВ) модуль із змінним кутом нахилу β , пропонується використовувати стандартні астрономічні та енергетичні моделі [35, 36]. Такий підхід дозволить оцінити продуктивність ФВ-станції, що живить тепловий насос повітря-вода в садибному будинку в с. Гостомель (Київська область). Модель базується на розрахунку позиції Сонця (деклінація, висота, азимут) та глобальної сонячної радіації на нахилений поверхні (пряма, дифузна та відбита компоненти).

Геометрична модель задачі є широко відомою та наводиться в багатьох працях, які стосуються досліджень інтенсивності сонячної радіації і розробки новітніх систем трекінгу ФЕМ за сонцем [37 - 40].

Розрахунок включає визначення деклінації Сонця (δ), рівняння часу (E), годинного кута (ω), висоти Сонця (α) та азимуту (ψ), що визначають кут падіння променів. Деклінація Сонця (δ), як кут нахилу осі Землі відносно екліптики, що змінюється протягом року визначається згідно з залежності [39-41]:

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin \left[\left(\frac{360^\circ}{360} \right) \cdot (284 + n) \right] \quad (1)$$

де n – день року, 1..365; коефіцієнт 23.45° – нахил осі Землі; 284 – зсув для максимуму влітку.

Інтенсивність сонячного випромінювання поза атмосферою визначається наступним чином [44]:

$$I_0 = G_{sc} \cdot \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360^\circ \cdot n}{365} \right) \right] \quad (2)$$

де $G_{sc} = 1367 \text{ Вт/м}^2$ – сонячна постійна [**Error! Reference source not found.-Error! Reference source not found.**]; коефіцієнт 0.033 – враховує ексцентриситет орбіти.

Поправка на нерівномірність руху Землі у вигляді розкладу функції в ряд Фур'є [47]:

$$\begin{aligned} E = 229.2 \cdot & \left(0.000075 + 0.001868 \cdot \cos \left(\frac{360^\circ}{365} \cdot (n - 1) \right) - 0.032077 \right. \\ & \cdot \sin \left(\frac{360^\circ}{365} \cdot (n - 1) \right) - 0.014615 \cdot \cos \left(2 \cdot \frac{360^\circ}{365} \cdot (n - 1) \right) \\ & \left. - 0.04089 \cdot \sin \left(2 \cdot \frac{360^\circ}{365} \cdot (n - 1) \right) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Годинний кут, як кут обертання Землі відносно полудня, визначається наступним чином:

$$\omega = 15^\circ \cdot (t_s - 12) \quad (4)$$

де $t_s = I_{time} + \frac{E}{60} + \frac{4}{60} \cdot (I_{st} - \lambda)$, $I_{st} = 30^\circ$ – стандартна довгота для UTC+2 год; коефіцієнт 15° – швидкість обертання Землі.

Висота Сонця у вимірі кута над горизонтом може бути знайдена згідно стандартної астрономічної формули для зенітного кута $z = 90^\circ - \alpha$:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (5)$$

І азимут Сонця визначається [53] як кут від півночі за годинниковою стрілкою з корекцією для післяполудня (якщо $\omega > 0$, $\psi = 360^\circ - \psi$):

$$\cos \psi = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \varphi} \quad (6)$$

Нижче наведена емпірична модель [49] для прямого випромінювання, що враховує розсіювання і поглинання, а також ослаблення радіації атмосферою, згідно якої прозорість атмосфери визначається залежністю:

$$\tau = a_0 + a_1 \cdot \exp\left(-\frac{k}{\cos z}\right) \quad (7)$$

де z – зенітний кут ($\cos z = \sin \alpha$), коефіцієнти для поверхні землі $a_0 = 0.4237 - 0.00821 \cdot (6 - 0)^2$, $a_1 = 0.5055 - 0.00595 \cdot (6.5 - 0)^2$, $k = 0.2711 - 0.01858 \cdot (2.5 - 0)^2$.

Пряма нормальна радіація і пряма горизонтальна радіація визначаються наступними залежностями [49]:

$$I_{bn} = I_0 \cdot \tau \quad (8)$$

$$I_{bh} = I_{bn} \cdot \cos z \quad (9)$$

Дифузна та глобальна радіація на горизонтальній поверхні розраховується згідно з відомих методів [50]:

$$I_{dh} = 0.1 \cdot I_0 \cdot (1 - \tau) \quad (10)$$

$$I_{gh} = I_{dh} + I_{bh} \quad (11)$$

Нарешті сонячна радіація на нахиленій поверхні ФЕМ для поверхні з кутом нахилу β (змінний) та азимутом $\gamma = 180^\circ$ (південь) визначається покроково. Кут падіння визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega + \\ & + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \omega \cdot \sin(\gamma - \omega) + \cos \delta \cdot \cos \beta \cdot \sin \omega \cdot \cos(\gamma - \omega) \end{aligned} \quad (12)$$

Відповідно пряма радіація на нахиленій поверхні:

$$I_{b_tilt} = I_{bn} \cdot \cos \theta \quad (13)$$

Дифузна радіація на нахиленій поверхні визначається так [51, 52]:

$$I_{d_tilt} = \frac{I_{dh} \cdot (1 + \cos \beta)}{2} \quad (14)$$

Відбита радіація від поверхні ФЕМ:

$$I_{r_tilt} = \frac{\rho \cdot I_{gh} \cdot (1 - \cos \beta)}{2} \quad (15)$$

де ρ – альbedo ФЕМ, приймається рівним 0.1.

Тоді загальна радіація, що надходить на модуль становитиме:

$$I_t = I_{b_tilt} + I_{d_tilt} + I_{r_tilt} \quad (16)$$

А добова сумарна радіація складатиме (моделювання потрібно інтегрувати по годинам):

$$H_t = \sum I_t \quad (17)$$

Описана фізична модель була трансформована в комп'ютерну модель для програмного комплексу Scilab 2025.1.0 [55]. Приклад програмного коду наведено в додатку 1. Результатами роботи коду є представлення помісячних даних щодо рівня сонячної радіації, яка надходить на нахилену поверхню фотоелектричного модуля та досягне вироблення електричної енергії. При цьому зміна коефіцієнту ефективності перетворення енергії в модулі приймалася рівною 22% [57]. Зміна ефективності перетворення при зміні зовнішніх факторів не враховувалася, хоча відносно просто може бути введена до моделі, використовуючи результати сучасних досліджень [58-59].

Програма виводить графік надходження сонячної радіації, отриманої електричної енергії, а також суму цих значень по сезону для різних варіантів кута нахилу. Приклад результуючого графіку наведено на рисунках 2 і 3.

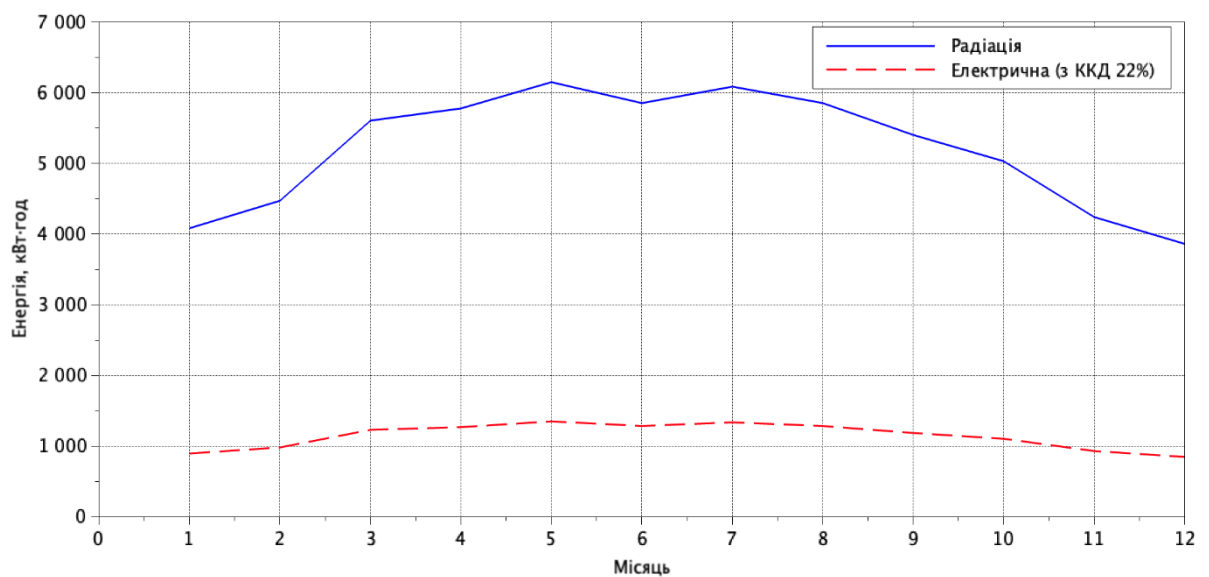


Рисунок 2. Результати розрахунку сонячної радіації та отриманої величини електричної енергії при ККД ФЕМ на рівні 22% для станції, розміщеної в географічних координатах с. Гостомель, Бучанського району, Київської області з кутом нахилу $\beta=38^\circ$ та площею ФЕМ на рівні 54.8 м^2 .

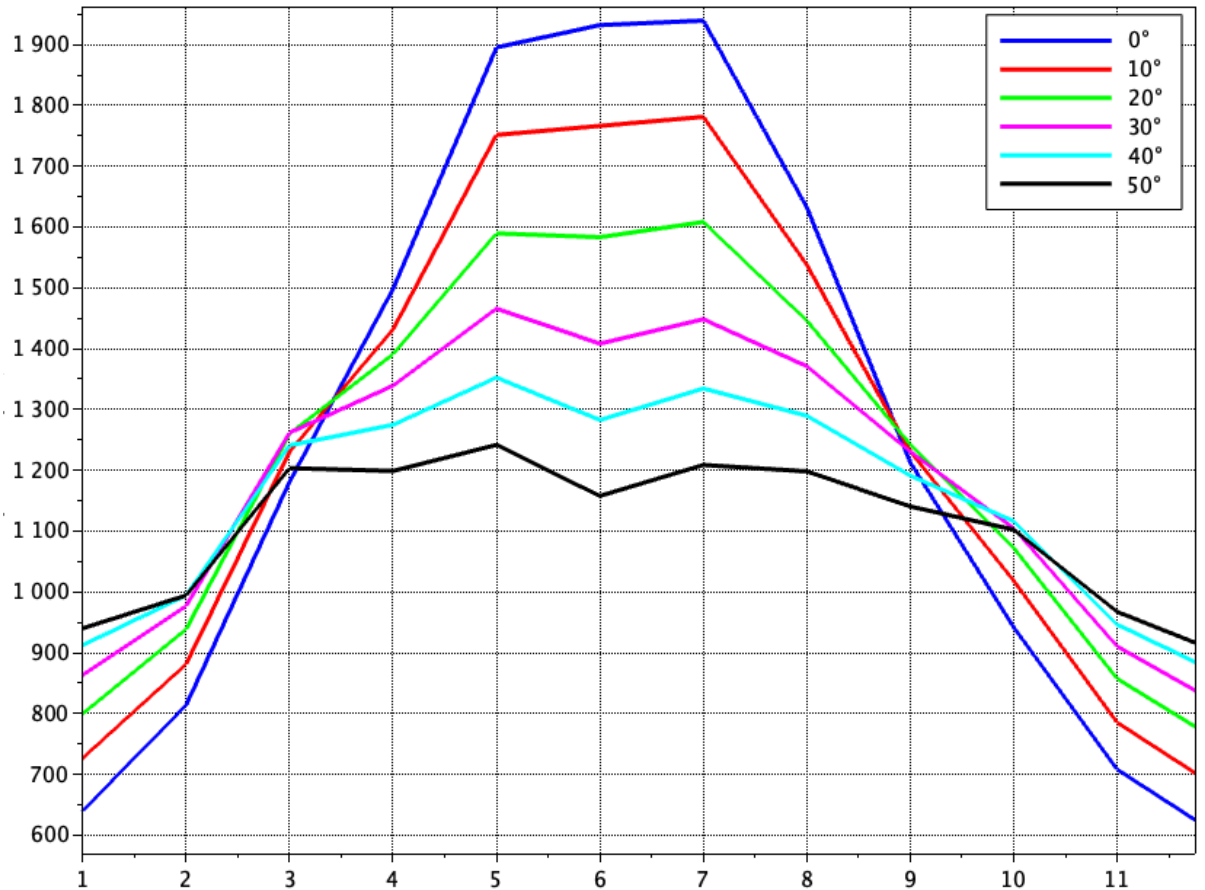


Рисунок 3. Результати розрахунку отриманої електричної енергії комп'ютерною моделлю для станції, розміщеної в географічних координатах с. Гостомель, Бучанського району, Київської області з кутом нахилу $\beta=0..50^\circ$ та площею ФЕМ на рівні 54.8 м^2 . Горизонтальна вісь – місяці, вертикальна – досяжне вироблення електричної енергії при ККД ФЕМ на рівні 22%.

Також програма розраховує сезонну генерацію електричної енергії і для прикладу вище такі показники становлять для $\beta = 0^\circ$: 14992.20 кВт·год, $\beta = 10^\circ$: 14815.67 кВт·год, $\beta = 20^\circ$: 14540.48 кВт·год, $\beta = 30^\circ$: 14194.02 кВт·год, $\beta = 40^\circ$: 13799.52 кВт·год, $\beta = 50^\circ$: 13252.09 кВт·год. Загалом результати, отримані при моделюванні, не повністю відповідають ряду висновків, зробленими іншими вченими [60] про оптимальний кут нахилу панелей. Варто зауважити, що модель не точно враховує кліматичні дані (особливо хмарність і опади), а лише оперує значенням загальної прозорості атмосфери.

Для корекції комп'ютерної моделі було проведено аналіз експериментальних даних (отриманих при роботі побутової сонячної

електричної станції, описаної вище). Загальний вигляд об'єкту, який досліджувався наведено на рисунку 4. Для формування даних застосовувався онлайн-застосунок Solarman Home [56]. Приклад масиву даних, який було отримано з системи автоматичного моніторингу наведено в таблиці 1.



Рисунок 4. Зліва-направо: загальний вигляд будинку, на плоскій покрівлі якого встановлено побутову сонячну електростанцію; система інвертора, акумулятора і обв'язки ФЕМ.

Таблиця 1. Приклад погодинних даних, отримані за результатами моніторингу

Updated Time	Pro duction Power(W)	Co nsumption Power(W)	Gri d Power(W)	Pur chasing Power(W)	Fee d-in Power(W)
2025/09/04 05:50	0.0	0.0	-	0.0	0.0
2025/09/04 05:55	0.0	99.00	110.00	110.00	0.00

2025/09/	0.0	0.0	409	409
04 06:00	0	0	.00	.00
2025/09/	0.0	794	800	800
04 06:10	0	.00	.00	.00
2025/09/	0.0	124	119.	119.
04 06:15	0	.00	00	00
2025/09/	0.0	63.	149	149
04 06:20	0	00	.00	.00
2025/09/	5.0	0.0	-	-
04 06:25	0	0	245.00	245.00
2025/09/	15.	73.	135	135
04 06:30	00	00	.00	.00
2025/09/	28.	0.0	-	-
04 06:35	00	0	204.00	204.00
2025/09/	42.	0.0	-	-
04 06:40	00	0	161.00	161.00
2025/09/	64.	0.0	-	-
04 06:45	00	0	328.00	328.00
2025/09/	101	903	883	883
04 06:55	.00	.00	.00	.00
2025/09/	127	687	479	479
04 07:00	.00	.00	.00	.00
2025/09/	154	593	360	360
04 07:05	.00	.00	.00	.00
2025/09/	163	122	118	118
04 07:10	.00	5.00	0.00	0.00
2025/09/	208	842	531	531
04 07:15	.00	.00	.00	.00

2025/09/	267	891	539	539
04 07:20	.00	.00	.00	.00
2025/09/	388	960	764	764
04 07:25	.00	.00	.00	.00
2025/09/	502	105	557	557
04 07:30	.00	9.00	.00	.00
2025/09/	762	355	-	-
04 07:40	.00	.00	397.00	397.00
2025/09/	952	187	-	-
04 07:45	.00	.00	879.00	879.00
2025/09/	118	168	-	-
04 07:50	8.00	.00	1102.00	1102.00
2025/09/	141	103	-	-
04 07:55	7.00	.00	1345.00	1345.00
2025/09/	133	169	-	-
04 08:00	5.00	.00	1147.00	1147.00
2025/09/	134	124	-	-
04 08:05	9.00	.00	1280.00	1280.00
2025/09/	130	0.0	-	-
04 08:10	3.00	0	1390.00	1390.00
2025/09/	141	11.0	-	-
04 08:15	5.00	0	959.00	959.00
2025/09/	120	63.	-	-
04 08:25	2.00	00	1054.00	1054.00
2025/09/	125	84.	-	-
04 08:30	4.00	00	1153.00	1153.00
2025/09/	136	158	-	-
04 08:35	6.00	.00	1297.00	1297.00

2025/09/	138	151	-	-
04 08:40	1.00	.00	1317.00	1317.00
2025/09/	111	0.0	-	-
04 08:45	0.00	0	982.00	982.00
2025/09/	149	0.0	-	-
04 08:50	2.00	0	1665.00	1665.00
2025/09/	989	0.0	-	-
04 08:55	.00	0	1106.00	1106.00
2025/09/	182	100	-	-
04 09:00	2.00	.00	1799.00	1799.00
2025/09/	190	0.0	-	-
04 09:10	7.00	0	1473.00	1473.00
2025/09/	263	128	-	-
04 09:15	8.00	.00	1571.00	1571.00

Цікавим є збіжність поведінки моделі і реальної станції в частині просідання генерації в шостому місяці. Таке просідання зростає зі збільшенням кута нахилу ФЕМ, що пояснюється відхиленням сонячного променя від перпендикуляру. Дані по виробленню електричної енергії, які ілюструють таку збіжність, наведені на рисунку 5.

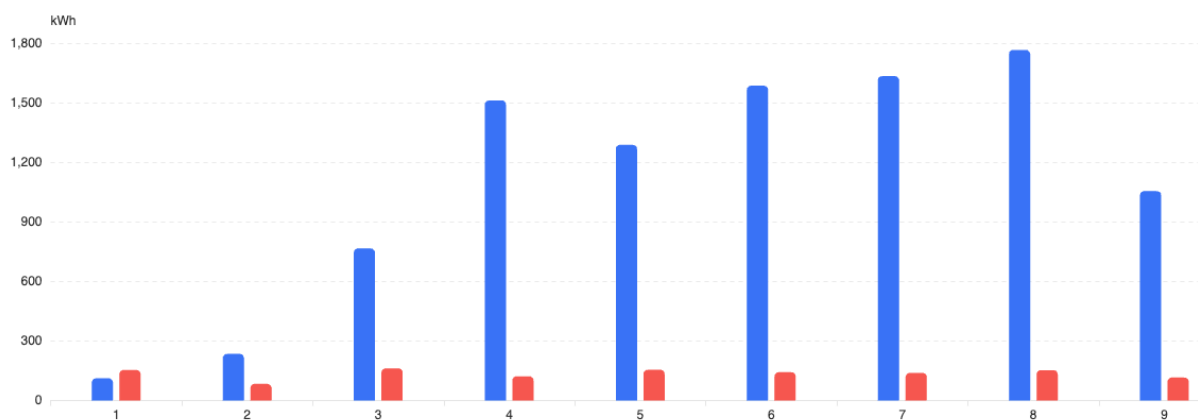


Рисунок 5. Фактичне вироблення електричної енергії досліджуваною побутовою СЕС (червоні стовпчики відображають споживання об'єктом дослідження і наведені ілюстративно)

На рисунку 6 наведено порівняння результатів комп'ютерного моделювання і експериментальних даних. Порівняння графіків говорить про збіжність показників моделі і реальних даних. Розбіжність має місце в 1-3 місяцях, що пов'язано з особливістю фізичного розташування станції. В цей період року побутова СЕС знаходиться в зоні затінення існуючими деревами.

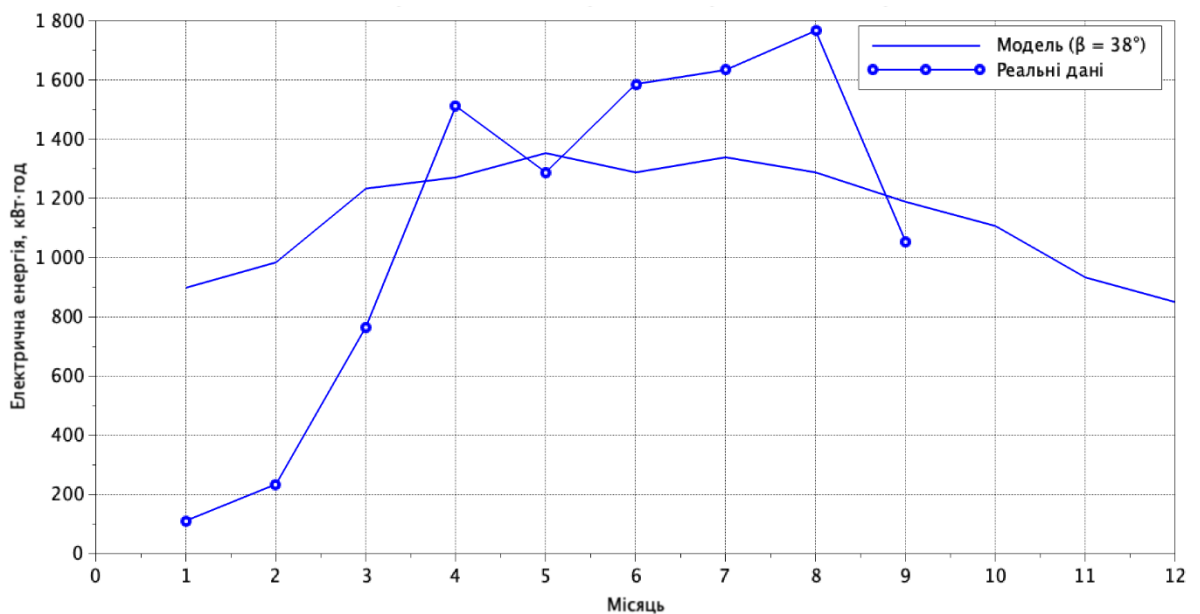


Рисунок 6. Порівняння показників комп'ютерної моделі і експериментальних даних

6.2. Застосування СЕС в якості джерела електричної енергії для теплового насосу в системі тепlopостачання індивідуального житлового будинку

Для оцінки можливості застосування згенерованої електричної енергії побутовою сонячною електростанцією для роботи системи тепlopостачання індивідуального житлового будинку на базі теплового насосу застосовується методика [61].

В якості об'єкту теплопостачання для розрахунків прийнято розглянутий на рис. 4 індивідуальний житловий будинок садибного типу. Термічний опір огорожувальних конструкцій даного будинку відповідає мінімальним нормативним вимогам згідно з ДБН В.2.6-31:2021 "Теплова ізоляція та енергоефективність будівель". Розрахункове теплове навантаження систем опалення та вентиляції становить 14 кВт. Розрахунок витрати теплоти для забезпечення системи ГВП був виконаний на розрахункову середньодобову витрату гарячої води – 150 л/добу (величина середньодобового споживання трьох дорослих людей). Розрахунок проводився для двох варіантів теплової потужності повітряного теплового насоса. У першому варіанті прийнято комбіноване джерело теплоти у складі теплового насоса з тепловою потужністю 10 кВт (при температурі зовнішнього повітря $+2^{\circ}\text{C}$) та електричного нагрівача в якості допоміжного джерела для покриття частини теплового навантаження після досягнення температури точки бівалентності. Температура точки бівалентності становить $-5,4^{\circ}\text{C}$, режим роботи – бівалентний паралельний. У другому варіанті тепловий насос працює в моновалентному режимі і, тому його тепла потужність прийнята рівною 25 кВт (при температурі зовнішнього повітря $+2^{\circ}\text{C}$). До розрахунку були прийняті погодинні температурні дані для кліматичних умов Київської області за останні 10 років. Результати представлені на графіку рис. 7.

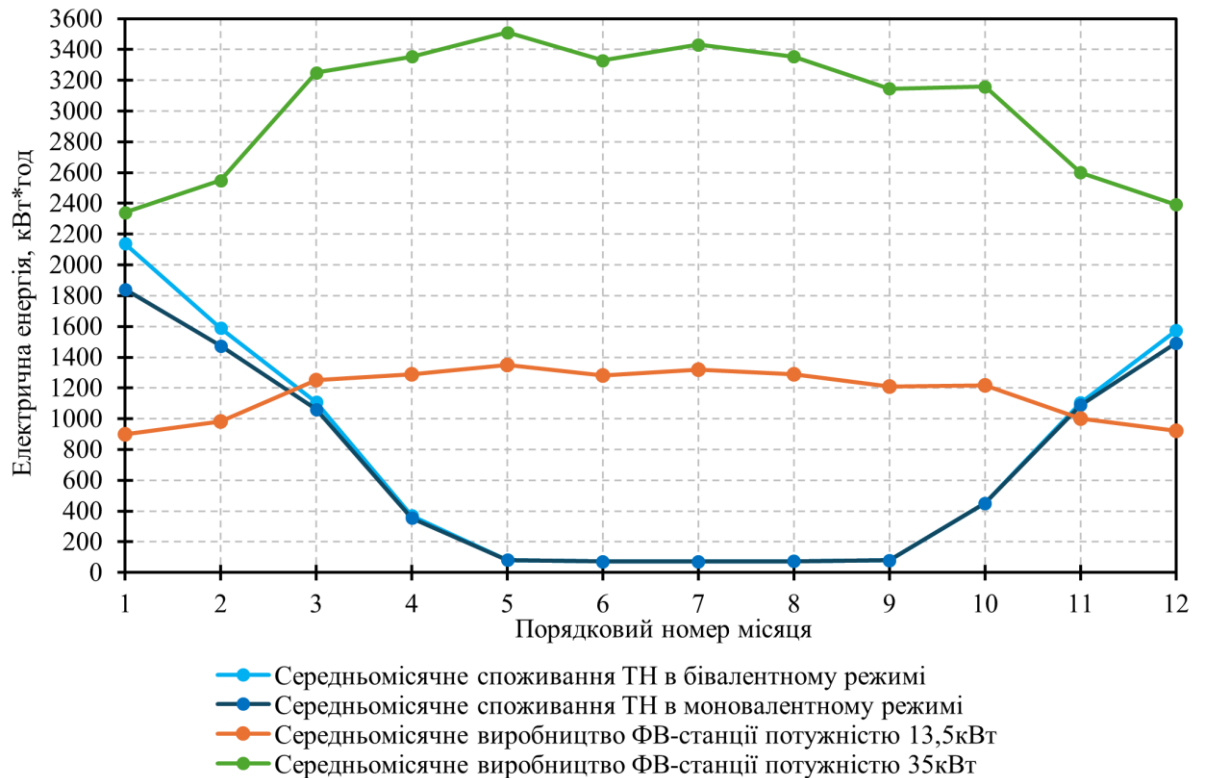


Рисунок 7. Порівняння кількості електроенергії, що в середньому виробляється ФВ-станцією з кількістю електроенергії, що в середньому споживається тепловим насосом по місяцям

З графіка видно, що за прийнятих умов встановленої побутової сонячної електростанції площею 54,8 м² достатньо для покриття електроспоживання теплового насосу в середньому на 40-60% у грудні, січні та листопаді та для покриття 90-100% у жовтні, листопаді, березні та квітні. І тим паче достатньо для того, щоб повністю забезпечити тепловий насос необхідною кількістю електроенергії для функціонування системи ГВП поза опалювальним періодом. Якщо ж збільшити площу ФВ-станції до 142,5 м², що еквівалентно розрахунковій електричній потужності величиною 35 кВт (нормативна межа електричної потужності СЕС з можливістю відпуску надлишку в мережу і для побутового використання), то вона зможе повністю покрити електроспоживання теплового насосу впродовж усього опалювального періоду. Порівнюючи величину середньомісячного електроспоживання прийнятих джерел теплоти, можна побачити, що незважаючи на велику

різницю в тепловій потужності теплових насосів, різниця в їх середньомісячному електроспоживанні є незначною. Це пояснюється низькою повторюваністю температур нижче точки бівалентності в останніх 10 опалювальних періодах та, як наслідок – невеликою часткою електроспоживання електричного нагрівача в бівалентному паралельному варіанті джерела теплоти.

Отже, можна зробити висновок, що побутова ФВ-станція з розрахунковою електричною потужністю 35 кВт може практично повністю покрити електроспоживання теплового насоса для забезпечення системи тепlopостачання звичайного індивідуального житлового будинку садибного типу.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було проведено комплексне дослідження та техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження фотоелектричної сонячної електростанції (СЕС) з пріоритетом продажу електроенергії в загальну мережу та одночасною інтеграцією теплогенеруючого обладнання у систему енергозабезпечення індивідуального житлового будинку, розташованого в умовах клімату Київської області.

У результаті аналізу було встановлено, що кліматичні умови регіону забезпечують достатній рівень сонячної інсоляції (1100–1300 кВт·год/м²/рік), що створює передумови для ефективної генерації електроенергії протягом усього року. Впровадження сонячної електростанції потужністю 10–15 кВт дозволяє забезпечити повне або часткове покриття електричних потреб домогосподарства, створити резерв для автономної роботи в умовах аварійного відключення мережі, а також генерувати надлишки енергії з метою продажу.

Проектована система на базі гібридного трифазного інвертора типу Deue з підтримкою акумуляторних батарей та резервного живлення демонструє високу гнучкість у роботі, ефективність управління енергією, а також здатність інтегрувати теплогенеруюче обладнання — теплові насоси, електрокотли або водяні ТЕНи. Застосування системи керування навантаженнями та оптимального алгоритму пріоритетів використання енергії (власне споживання → акумуляція → продаж) забезпечує максимальне використання сонячного ресурсу та підвищує загальний рівень енергетичної незалежності будинку.

Проведені експериментальні дослідження реальної СЕС потужністю 15 кВт підтвердили ефективність такої системи. Річне виробництво електроенергії сягало понад 16 000 кВт·год, із забезпеченням самоспоживання, продажу в мережу та стабільної роботи системи опалення. Було підтверджено, що навіть у зимовий період система продовжує генерувати

електроенергію, а за наявності акумуляторного буфера забезпечує критичне живлення споживачів до 12 годин.

Таким чином, результати роботи підтверджують технічну доцільність, енергетичну ефективність та економічну вигідність впровадження фотоелектричної станції в умовах індивідуального житлового будинку Київської області. Розроблені технічні рішення можуть бути рекомендовані до реалізації як частина стратегії енергоефективного та сталого розвитку житлової забудови в Україні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Херез, С., Тобін, І., Вотар, Р. та ін. Вплив зміни клімату на фотоелектричне виробництво електроенергії в Європі. *Nat Commun* **6**, 10014 (2015). Режим доступу URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms10014>.
2. Бодіс, К.; Кугіас, І.; Тейлор, Н.; Jäger-Waldau, А. Сонячна фотоелектрична генерація електроенергії: життєвий шлях для європейських вугільних регіонів з перехідною економікою. *Сталий розвиток* 2019, **11**, 3703. Режим доступу URL: <https://doi.org/10.3390/su11133703>
3. Matláry, JH Розвиток енергетичної політики в Європейському Союзі. Енергетична політика в Європейському Союзі ; Серія Європейського Союзу; Palgrave: Лондон, Великобританія, 1997; С. 12–24. [Google Scholar] [CrossRef]
4. G. Kakoulaki, S. Szabo. Енергопродуктивність мікроінверторних фотоелектричних мікроустановок: порівняння результатів моделювання та вимірювань — приклад Польщі. *Journal of Cleaner Production*, 2024. Режим доступу URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124000674> [Дата звернення: 25 листопада 2024].
5. Бозік, Н.; Szeberényi, А.; Бозік, Н. Вплив зміни клімату на виробництво електроенергії з фотоелектричних модульних систем середнього розміру на основі кліматичних сценаріїв RCP. *Енергії* 2024, **17**, 4009. Режим доступу URL: <https://doi.org/10.3390/en17164009>
6. Gyorgy Varga, Fruzsina Gresina. Вплив епізодів сахарського пилу на точність прогнозу виробництва фотоелектричної енергії в Угорщині (Центральна Європа). *Journal of Cleaner Production*. Режим доступу URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124000121> [Дата звернення: 25 листопада 2024].
7. Петр Ольчак. Енергопродуктивність мікроінверторних фотоелектричних мікроустановок: порівняння результатів моделювання та

вимірювань — приклад Польщі. *Energies*. Режим доступу URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/20/7582> [Дата звернення: 25 листопада 2024].

8. Cronin, J., Anandarajah, G., Dessens, O. Climate change impacts on the energy system: A review of trends and gaps. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2018, 98, 160–180. Режим доступу URL: [10.1016/j.rser.2018.09.020] (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.020>).

9. Li, X., Li, Y., Xie, J., Liu, C. Research on hydrogen energy industry competitiveness and its influencing factors: A global perspective. *Renewable Energy*. 2023. Режим доступу URL: [10.1016/j.renene.2023.11.012](https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.11.012).

10. Сун, Л. (2020). Potential for Solar Energy Generation on Rooftops in the EU and Policy Implications. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(4), 064501. Режим доступу URL: https://www.scirp.org/html/1-6401321_44027.htm

11. Лі, Ю., Кім, Дж., Лі, С. та ін. (2024). The Impact of Solar Energy Systems on Building Efficiency: A Case Study of European Union Policy. *Nature Communications*, 15(1), 1234. Режим доступу URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50762-7>

12. Ван, П. (2019). Solar Photovoltaic Power on Building Rooftops: Global Trends and Policy Strategies. *SSRN Electronic Journal*. Режим доступу URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3094606

13. Кім, С., Чен, Ю. та ін. (2021). Innovative Approaches for Solar Energy Integration in Urban Infrastructure. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 16(2), 150-167. Режим доступу URL: <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1950219>.

14. Дженкінс, С., Морріс, Т. (2020). Efficiency of Solar Photovoltaic Systems on Building Rooftops in Europe. *Energy Policy*, 134, 111-123. Режим доступу URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111123>

15. Ші, Х., Лі, П., та ін. (2024). Sustainability of Solar Energy in Urban Environments: A Long-Term Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112275. Режим доступу URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.112275>

16. K. J. A. et al., "Techno-economic analysis of optimizing the cost of photovoltaic electricity in high-latitude regions," ScienceDirect, Режим доступу URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772940024000225>, 2024.
17. P. M. et al., "Energy Consumption and Efficiency in Smart Grid Systems," MDPI, Electronics, 9(1):141, Режим доступу URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/1/141>, 2020.
18. Zhang X., Xu M., Wang S., Huang Y. та Xie Z.: Картографування фотоелектричних електростанцій у Китаї за допомогою Landsat, випадкового лісу та Google Earth Engine, Earth Syst. Sci. Дані, 14, Режим доступу URL: 3743–3755, <https://doi.org/10.5194/essd-14-3743-2022>, 2022.
19. M. G. et al., "Recent advances in renewable energy technologies," SpringerLink, Renewable Energy, Режим доступу URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12302-023-00832-2>, 2023.
20. C. L. et al., "A study of energy management strategies in residential photovoltaic systems," ScienceDirect, Режим доступу URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924003076>, 2024.
21. Pohosov, O., Skochko, V., Solonnikov, V., Kyrychenko, M., & Cherpurna, N. (2024). Passive individual residential building overview and concept for a continental temperate climate. Architectural Studies, 2(10), 14-24.
22. Шабанов Н., Дорошенко А. ТЕХНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ. VI Міжнародна студентська наукова конференція «МІЖДИСЦИПЛІНАРНІ НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ», 14 березня 2025 р., м. Миколаїв, 2025. С. 92–94. URL: <https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/article/view/1658>.
23. Козячина , Б., & Пасічник , П. (2025). ПОРІВНЯННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ У ВАРІАЦІЯХ З МЕРЕЖЕВИМ ТА ГІБРИДНИМ ІНВЕРТОРАМИ. Матеріали конференцій МЦНД, (14.03.2025; Кривий Ріг,

Україна), 139–142. вилучено із <https://archives.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/article/view/639>

24. Коваль В. І., Шевченко О. П. Експериментальне дослідження роботи сонячної електричної станції в умовах налипання снігу на фотоелектричні модулі [Електронний ресурс] // ResearchGate, 2024. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/390232891_EKSPERIMENTALNE_DOSLIDZENNA_ROBOTI_SONACNOI_ELEKTRICNOI_STANCII_V_UMOVAH_NALIPANNA_SNIGU_NA_FOTOELEKTRICNI_MODULI (дата звернення: 27.10.2025).

25. Dan, D., Tanasa, C., Stoian, V., Brata, S., Stoian, D., Gyorgy, T. N., & Florut, S. C. (2016). Passive house design—An efficient solution for residential buildings in Romania. *Energy for Sustainable Development*, 32, 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.03.007>.

26. Pohosov, O., Skochko, V., Solonnikov, V., Kyrychenko, M., & Chepurna, N. (2024). Passive individual residential building overview and concept for a continental temperate climate. *Architectural Studies*, 10(2), 14-24. <https://doi.org/10.56318/as/2.2024.14>.

27. Konovalov, D., Kobalava, H., Radchenko, M., Karpoff, M., & Shapovalov, Y. (2023, August). Energy Efficiency of Combined Heating Systems Based on Heat Pumps for Private Residential Buildings Under the Climatic Conditions of Ukraine. In Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (pp. 531-540). Cham: Springer Nature Switzerland.

28. Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_49.

29. Huang, M., Wapler, J., Helmling, S., Iturralde, J., Civalleri, L., Hengel, F., ... & Günther, D. (2025). Energy performance of photovoltaic-assisted two-stage heat pump systems in existing multi-family buildings: Three case studies from Europe. *Energy*, 137224. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137224>.

30. Dębska, L., Honus, S., Dębek, L., & Nowak, A. (2024). Performance of the Heat Pump and Photovoltaic Systems Installed in the Single-family House. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 26, 74-83. <https://bibliotekanauki.pl/articles/58907714>.
31. Roure R, Chèze D and Vallée M. Model predictive control of solar-coupled innovative heat pump: a comparison of economic and environmental optimizations in Latvia [version 2; peer review: 1 approved, 2 approved with reservations]. *Open Res Europe* 2023, 3:17. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.14992.2>.
32. Petrychenko, O., Levinskyi, M., Goolak, S., & Lukoševičius, V. (2025). Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport. *Sustainability*, 17(5), 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.
33. ALLOUHI, Amine, An Innovative Power-to-Heat Concept Based on a Solar PV Plant and Geothermal Heat Pumps: An Environmental Accounting Perspective. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3974011>.
34. Trypolska, G., Gradziuk, P., Semeniuk, A., Podolets, R., & Diachuk, O. (2024). Advancing Heat Pump Adoption in Ukraine's Low-Carbon Energy Transition. *Energies*, 17(23), 6110. <https://doi.org/10.3390/en17236110>.
35. Serenelli, A. Alive and well: A short review about standard solar models. *Eur. Phys. J. A* 52, 78 (2016). <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16078-1>
36. 1. Jenkins, A. (2013). The Sun's position in the sky. *European Journal of Physics*, 34(3), 633. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/34/3/633>
37. Жолубак, І. М., & Матвієць, В. Ю. (2022). Трекер для сонячних електростанцій. *Computer systems and networks*, 4(1), 44. <https://doi.org/10.23939/csn2022.01.037>
38. Yang, Z., & Xiao, Z. (2023). A review of the sustainable development of solar photovoltaic tracking system technology. *Energies*, 16(23), 7768.
39. Awasthi, A., Shukla, A. K., SR, M. M., Dondariya, C., Shukla, K. N., Porwal, D., & Richhariya, G. (2020). Review on sun tracking technology in solar PV system. *Energy Reports*, 6, 392-405.
40. Khavrus, V., & Shelevytsky, I. (2010). Introduction to solar motion geometry on the basis of a simple model. *Physics Education*, 45(6), 641.

41. J. A. Duffie and W. A. Beckman, "Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd Edition" pp. 13-14, J. Wiley and Sons, New York (2006)
42. J. W. Spencer, "Fourier series representation of the position of the sun" in *Search 2* (5), p. 172 (1971)
43. Daryl R. Myers, "Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications", p. 4 CRC Press (2013)
44. M. Reno, C. Hansen, and J. Stein, "Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis", Sandia National Laboratories, SAND2012-2389, 2012.
45. <http://solardata.uoregon.edu/SolarRadiationBasics.html>, Eqs. SR1 and SR2
46. ASCE, 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation, Environmental and Water Resources Institute of the American Civil Engineers, Ed. R. G. Allen et al.
47. J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, "Atmospheric Chemistry and Physics" p. 132, J. Wiley (1998).
48. The Astronomical Almanac for the Year. The United Naval Observatory, 2019.
49. Hottel, H. C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar energy*, 18(2), 129-134. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(76\)90045-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(76)90045-1).
50. Bastien, Diane. (2010). Analysis of the Solar Radiation Distribution and Passive Thermal Response of an Attached Solarium/Greenhouse. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1040&context=ihpbc>.
51. Kamphuis, N. R., Gueymard, C. A., Holtzapple, M. T., Duggleby, A. T., & Annamalai, K. (2020). Perspectives on the origin, derivation, meaning, and significance of the isotropic sky model. *Solar Energy*, 201, 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.067>.
52. Gracia Amillo, A., & Huld, T. (2013). Performance comparison of different models for the estimation of global irradiance on inclined surfaces. Validation of the model implemented in PVGIS; JRC Technical Report; Publications Office of the

- European Union: Brussels, EUR, 26075.
https://publications.europa.eu/resource/cellar/4ef8c4e1-4397-4e27-8487-448786327f27.0001.01/DOC_1.
53. Відьмаченко А.П., Мороженко О.В. Порівняльна планетологія. Навчальний посібник // Київ: Національна академія наук України, Головна астрономічна обсерваторія. ТОВ ДІА. - 2013. – 552 с.
54. Willson, R. C., and A. V. Mordvinov (2003), Віковий тренд змін повної сонячної світимості в ході циклів 21-23 (en), *Geophys. Res. Lett.*, 30(5), 1199, doi:10.1029/2002GL016038, <http://www.agu.org/journals/gl/gl0905/2008GL036307>
55. Scilab 2025.1.0. Dassault Systemes. <https://www.scilab.org/download/scilab-2025.1.0>.
56. Solarman Home. Solarman Smart. <https://home.solarmanpv.com/login>.
57. Технічні характеристики Jinko Solar. Доступ за посиланням: https://www.jyansolar.com/Jinko-Solar-Panel1575600W.html?gad_source=1&gad_campaignid=22298019969&gbraid=0AAA7qarnN11VwRjCdzT8cpo78r0qLz&gclid=Cj0KCQjw3OjGBhDYARIsADduX4HXrfC4T0GY9HuBg1Oee1bRpyuT47wP2XTLZfcgUrWuI4k65mI_UaAgUoEALw_wcB.
58. Fesharaki, V. J., Dehghani, M., Fesharaki, J. J., & Tavasoli, H. (2011, November). The effect of temperature on photovoltaic cell efficiency. In *Proceedings of the 1st International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation– ETEC*, Tehran, Iran (Vol. 20, pp. 20-21).
59. Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. *Energy procedia*, 33, 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>.
60. Hussein, H. M. S., Ahmad, G. E., & El-Ghetany, H. H. (2004). Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations. *Energy conversion and management*, 45(15-16), 2441-2452. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.11.013>.

61. Pohosov, O., Pasichnyk, P., Kulinko, Y., Koziachyna, B., Melnychenko, O., & Osypov, V. (2025). Devising a methodology for assessing seasonal thermal energy generation by a combined heat source. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8 (133), 56–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.323755>.

ДОДАТКИ

Додаток 1. Комп'ютерна модель інтенсивності сонячної радіації та відповідного вироблення електричної енергії ФЕМ

// Модель в-ва електричної енергії для ФВ-модулів у Києві (clear-sky) з порівнянням із реальними даними
// Для Scilab 2025.1.0, з ККД 22%, введенням кута нахилу та площі

```
clear; clc;
```

```
// Константи
```

```
phi = 50.45; // Широта Києва, град
lambda = 30.52; // Довгота Києва, град
rho = 0.1; // Альbedo (відбиття від ФЕМ)
lst = 30; // Стандартна довгота для часового поясу UTC+02:00, град
Gsc = 1367; // Сонячна постійна, Вт/м2
eta = 0.22; // ККД ФВ-модулів (22%)
```

```
// Параметри атмосфери (Hottel модель для висоти 0 км, clear-sky)
```

```
a0 = 0.4237 - 0.00821 * (6 - 0)^2;
a1 = 0.5055 - 0.00595 * (6.5 - 0)^2;
k = 0.2711 - 0.01858 * (2.5 - 0)^2;
```

```
// Дні в місяцях (2025 - не високосний рік)
```

```
days_in_month = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31];
```

```
// Представницькі дні року (n) для місяців (стандарт Duffie & Beckman)
```

```
rep_n = [17, 47, 75, 105, 135, 162, 198, 228, 258, 288, 319, 345];
```

```
// Реальні дані з файлу (Production-This Month, kWh, січень-вересень)
```

```
real_production = [111.80, 234.90, 766.00, 1511.50, 1287.70, 1585.70, 1633.50, 1765.70, 1054.70];
```

```
// Ввід користувача
```

```
A = input("Введіть площу ФВ-модулів (A, м2): ");
beta = input("Введіть кут нахилу ФВ-модулів (β, град): ");
```

```
// Масив для щомісячної електричної енергії (1 кут × 12 місяців)
```

```
E_el_month = zeros(1, 12);
```

```
// Обчислення для введеного кута нахилу
```

```
for m = 1:12
    n = rep_n(m);
```

```
// Деклінація Сонця δ, град
```

```
delta = 23.45 * sin((360 / 365) * (284 + n) * %pi / 180);
```

```
// Позатеррестрійна радіація I0, Вт/м2
```

```
I0 = Gsc * (1 + 0.033 * cos(360 * n / 365 * %pi / 180));
```

```
// Рівняння часу E, хв
```

```
B = (360 / 365) * (n - 1) * %pi / 180;
E = 229.2 * (0.000075 + 0.001868 * cos(B) - 0.032077 * sin(B) - 0.014615 * cos(2 * B) - 0.04089 * sin(2 * B));
```

```
// Сумарна добова радіація H_t, Вт·год/м2/добу
```

```
H_t = 0;
```

```
for t = 0:23
```

```
    l_time = t + 0.5; // Центр години
```

```
    ts = l_time + (E / 60) + (4 / 60) * (lst - lambda); // Сонячний час, год
```

```
    omega = 15 * (ts - 12); // Годинний кут, град
```

```
// Синус висоти Сонця sin(alpha)
```

```
    sin_alpha = sin(phi * %pi / 180) * sin(delta * %pi / 180) + cos(phi * %pi / 180) * cos(delta * %pi / 180) * cos(omega * %pi / 180);
```

```

if sin_alpha > 0 then
    alpha = asin(sin_alpha) * 180 / %pi; // Висота  $\alpha$ , град
    cos_z = sin_alpha; //  $\cos(z) = \sin(\alpha)$ 

    // Прозорість tau для прямого випромінювання
    tau = a0 + a1 * exp(-k / cos_z);

    // Пряма нормальна I_bn, Вт/м2
    I_bn = I0 * tau;

    // Пряма на горизонтальній I_bh, Вт/м2
    I_bh = I_bn * cos_z;

    // Дифузна на горизонтальній I_dh, Вт/м2
    I_dh = 0.1 * I0 * (1 - tau);

    // Глобальна на горизонтальній I_gh, Вт/м2
    I_gh = I_bh + I_dh;

    // Азимут Сонця  $\psi$ , град (0 - північ, 90 - схід, 180 - південь)
    cos_psi = (sin_alpha * sin(phi * %pi / 180) - sin(delta * %pi / 180)) / (cos(alpha * %pi / 180) * cos(phi * %pi /
180));
    psi = acos(cos_psi) * 180 / %pi;
    if omega > 0 then
        psi = 360 - psi; // Після полудня
    end

    // Азимут поверхні  $\gamma = 180^\circ$  (південь)
    gamma = 180;

    // Cos кута падіння  $\theta$ 
    cos_theta = sin(delta * %pi / 180) * sin((phi - beta) * %pi / 180) + ...
        cos(delta * %pi / 180) * cos((phi - beta) * %pi / 180) * cos(omega * %pi / 180) + ...
        cos(delta * %pi / 180) * sin(beta * %pi / 180) * sin(omega * %pi / 180) * sin((gamma - psi) * %pi / 180) + ...
        cos(delta * %pi / 180) * cos(beta * %pi / 180) * sin(omega * %pi / 180) * cos((gamma - psi) * %pi / 180);
    cos_theta = max(cos_theta, 0);

    // Компоненти на нахиленій поверхні, Вт/м2
    I_b_tilt = I_bn * cos_theta;
    I_d_tilt = I_dh * (1 + cos(beta * %pi / 180)) / 2;
    I_r_tilt = rho * I_gh * (1 - cos(beta * %pi / 180)) / 2;

    I_t = I_b_tilt + I_d_tilt + I_r_tilt;

    H_t = H_t + I_t; // Сумарно за годину, Вт·год/м2
end
end

H_t = H_t / 1000; // кВт·год/м2/добу

// Щомісячна електрична енергія, кВт·год
E_el_month(m) = H_t * days_in_month(m) * A * eta;
end

// Вивід графіка
scf();
plot(1:12, E_el_month, 'b-', 'thickness', 3); // Модель для введеного кута
plot(1:9, real_production, 'o-', 'thickness', 3); // Реальні дані (січень-вересень)
xlabel("Щомісячне виробництво електричної енергії (модель та реальні дані)", "Місяць", "Електрична енергія, кВт·год");
legend(["Модель ( $\beta = " + \text{string}(\text{beta}) + "^\circ$ )", "Реальні дані"], 1);
xgrid();

// Збільшення шрифту (з дефолтним шрифтом Scilab)
a = gca();
a.title.font_size = 4;
a.x_label.font_size = 3;
a.y_label.font_size = 3;

```

```
a.labels_font_size = 3;
```

```
// Збільшення шрифту легенди
```

```
l = gce();
```

```
l.font_size = 3;
```

```
// Додатковий вивід сумарної річної електричної енергії
```

```
E_el_year = sum(E_el_month);
```

```
mprintf("Річна електрична енергія для  $\beta = %d^\circ$ :  $%.2f$  кВт·год\n", beta, E_el_year);
```

```
mprintf("Сумарна реальна енергія за 9 місяців:  $%.2f$  кВт·год\n", sum(real_production));
```

Додаток 2. Схеми позначень елементів системи

Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Маса од., кг	Примітки	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Маса од., кг	Примітки
K.3	HSM 25/6	Комплект швидкого монтажу опалювального контуру зі змішувачем	2			K.12		Термостатичний змішувальний клапан гарячої води	1		
						K.13		Розширювальний бак двівалентного баку ГВП	1		
K.3.1	HS 25/6	Комплект швидкого монтажу опалювального контуру без змішувача	2			K.14	0SG160S1AB	Запобіжний клапан баку ГВП	1		
								Група безпеки бойлера			
K.4	NKV 4/25/40	Колектор опалювальних контурів на 4 виходи	1			K.15		Розширювальний бак мережевих контурів	1		
K.5	Logasol SKN 4.0	Геліоколектор	3			K.16		Розширювальний бак буферного баку	1		
	Перспектива										
K.6	Logasol KS 0110/2	Комплектна геліостанція	1			K.17	0SG160S1AB	Запобіжний клапан буферного баку	1		
	Перспектива										
K.7	Logalux SH290 RS-B	Бівалентний бак ГВП	1					Група безпеки буферного баку			
	Перспектива										
K.8	BH 200-5 1 B	Буферний бак для опалення та процесу охолодження в ізоляції	1			K.18	Compress 7000i AW	Тепловий насос "Повітря-Вода" Q=13 кВт, у складі: Зовнішній блок Внутрішній блок з ел. догрівачем	1		
K.9	Перспектива	Мембранний розширювальний бак геліоконтур	1								
						K.19		Триходовий перемикаючий клапан 1" приготування ГВП	1		
K.10	Перспектива	Запобіжний клапан геліоконтур	1								
K.11	WILO Star-RS 15/6	Циркуляційний насос ГВП	1			K.20	Afriso AZV643	Триходовий перемикаючий клапан 1"	1		