

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ
ТЕПЛООВОГО НАСОСУ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-42
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Драбик І.Б.
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л.Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Шелестовський Б.Г.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Драбику Ігорю Богдановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз можливості використання фотоелектричної станції для живлення теплового насосу приватного будинку

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від 31» зрудня 2025 року № 4/7-1163.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи фотоелектрична станція повинна живити тепловий насос потужністю 6 кВт в м. Чернігів

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Теплові насоси для систем опалення та гарячого водопостачання

2. Робота сонячної фотоелектричної панелі

3. Система акумулювання енергії в батареях

4. Сезонні тенденції у щомісячному споживанні електроенергії

5. Методика проведення розрахунків

6. Результати розрахунків

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Схема системи опалення та гарячого водопостачання з тепловим насосом

2. Принцип роботи сонячної системи

3. Система теплового насосу NIBE F2050-6KW

4. Щомісячне споживання електроенергії

5. Взаємозв'язок між потребою в теплі та температурою повітря зовні в осінні місяці

6. Коефіцієнт самозабезпечення

7. Середньомісячний рівень заряду

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Мовчан Л.Т., к.т.н., доц. кафедри ЕІ</i>		

7. Дата видачі завдання _____ 04.01.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 19.04.2026 по 25.04.2026	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 25.04.2026 по 21.05.2026	
3	Підготовка розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	з 21.05.2026 по 23.05.2026	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 23.05.2026 по 24.05.2026	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 24.05.2026 по 28.05.2026	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 28.05.2026 по 01.06.2026	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 01.06.2026 по 05.06.2026	

Студент _____
(підпис)

Драбик І.Б.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Коваль В.П.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–42. - Т. : ТНТУ, 2026.

Стор. 71; рис. 23; табл. 4; креслень (презентацій) 15; джерел 28.

Мета кваліфікаційної роботи: встановити можливість живлення системи опалення та гарячого водопостачання житлового будинку з тепловим насосом від фотоелектричної сонячної електростанції в умовах помірно-континентального клімату (м.Чернігів) та визначити енергетичну автономність системи залежно від потужності фотоелектричних панелей та ємності акумуляторної батареї.

У роботі проведено аналітичний огляд принципів роботи, класифікації та показників ефективності теплових насосів, а також особливостей функціонування фотоелектричних станцій у холодному кліматі. Виконано збір та обробку експлуатаційних даних теплового насоса приватного будинку площею 85 м² у м. Чернігові. Визначено річне споживання електроенергії та сезонні коливання навантаження. Визначено залежність коефіцієнта самозабезпечення комбінованої системи «фотоелектрична станція – акумулятор – тепловий насос» від потужності фотоелектричних панелей та ємності акумуляторної батареї. Встановлено сезонну невідповідність між виробництвом сонячної енергії та попитом теплового насоса, обґрунтувати доцільність гібридної схеми енергопостачання.

Ключові слова: ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, АКУМУЛЯТОР, ЖИВЛЕННЯ, ТЕПЛОВИЙ НАСОС

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Загальні відомості про теплові насоси	9
1.2 Принцип роботи теплового насоса	10
1.3 Класифікація теплових насосів	11
1.4 Геотермальні теплові насоси	12
1.5 Теплові насоси для систем опалення та гарячого водопостачання	14
1.6 Показники ефективності теплових насосів	15
1.7 Сучасний стан та перспективи розвитку теплових насосів	17
1.8 Аналіз досвіду запровадження сонячної фотоелектричної системи електропостачання для живлення теплових насосів	18
1.9 Висновки до розділу	21
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	22
2.1 Потреба в опаленні в холодному кліматі	22
2.2 Аналіз роботи теплового насоса «повітря-вода»	23
2.3 Залежність COP теплового насосу від температури	25
2.4 Робота сонячної фотоелектричної панелі	26
2.5 Принцип роботи фотоелектричної системи	27
2.6 Ефективність фотоелектричної системи	28
2.7 Система акумулювання енергії в батареях (BESS)	29
2.8 Місцезнаходження об'єкту електро- і теплопостачання	31
2.9 Опис будинку	32
2.10 Опис системи теплового насосу	33
2.11 Збір даних	34
2.12 Сезонні тенденції у щомісячному споживанні електроенергії	36
2.13 Висновки до розділу	38

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	40
3.1 Методика проведення розрахунків.....	40
3.1.1 Моделювання потреби в опаленні	40
3.1.2 Ефективність теплового насоса	41
3.1.3 Виробництво фотоелектричної енергії	42
3.1.4 Динаміка акумуляторного зберігання	42
3.1.5 Енергетичний баланс та самодостатність	43
3.2 Результати розрахунків	44
3.2.1 Вплив зовнішньої температури на потребу в теплі	44
3.2.2 Вплив температури повітря зовні на гарячу воду	45
3.2.3 Сезонна закономірність сонячної енергії	47
3.2.4 Продуктивність теплового насоса та температура повітря зовні	48
3.2.5 Сезонні коливання попиту на електроенергію	49
3.2.6 Динаміка заряду акумуляторної батареї протягом 5 років	50
3.2.7 Коефіцієнт самозабезпечення в залежності від розміру фотоелектричної системи та ємності акумулятора	52
3.2.8 Річний коефіцієнт самозабезпечення для різних конфігурацій фотоелектричних систем та акумуляторів	53
3.2.9 Сезонні коливання рівня заряду акумулятора	54
3.3 Аналіз отриманих результатів	55
3.4 Висновки до розділу	56
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	59
4.1 Причини електротравм, напруга кроку	59
4.2 Блискавкозахист	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	65
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	67

ВСТУП

Актуальність теми.

Домогосподарства споживають значну частину світової енергії та є джерелом значних обсягів парникових газів (ПГ), що завдають шкоди довкіллю. З 2005 по 2022 рік викиди від будівель у Європейському Союзі зменшилися на 34 %. Цей сектор посів друге місце за інтенсивністю викидів парникових газів, випускаючи 27 кілограмів вуглекислого газу на квадратний метр щорічно. До 2030 року такі країни, як Данія, Фінляндія, Словенія та Швеція, планують вжити додаткових заходів для скорочення рівнів викидів ПГ від будівель більш ніж на 70% порівняно з 2005 роком. Це показує, чому розумніше та сталіше використання енергії в домашніх умовах є таким важливим, особливо в холодних місцях, таких як м.Чернігів, Україна, де людям потрібне опалення приміщень протягом значної частини року і існує цілорічний попит на гарячу воду для побутових потреб. Одним із найкращих способів боротьби зі зміною клімату є скорочення викидів парникових газів. Північні країни, такі як Швеція та Норвегія, за останнє десятиліття стали залежними від електроенергії з відновлюваних джерел. У найближчі 5–10 років лише кілька країн, таких як Швеція та Норвегія, мають амбіції досягти 100% виробництва енергії з відновлюваних джерел .

У країнах з холодним кліматом, житлові будинки мають значні енергетичні потреби для опалення приміщень у холодну пору року та для гарячого водопостачання протягом усього року. Ці енергетичні потреби коливаються залежно від пори року, причому найбільше навантаження на енергетичні системи припадає на зимові місяці. Ці сезонні коливання також відображаються на доступності сонячної енергії, наприклад, у Чернігові, де взимку сонячна радіація набагато менша, ніж влітку, а тривалість світлового дня значно коротша і кут падіння сонячних променів менший. Теплові насоси «повітря-вода» набули популярності як енергоефективне рішення для зменшення споживання енергії та підтримки екологічної стійкості. Ці системи

працюють, забираючи тепло з зовнішнього повітря та використовуючи його для обігріву будинку та забезпечення гарячою водою. Хоча вони є дуже ефективними, їм все одно потрібна електроенергія з електромережі, що призводить до підвищення рахунків за електроенергію.

Мета кваліфікаційної роботи: встановити можливість живлення системи опалення та гарячого водопостачання житлового будинку з тепловим насосом від фотоелектричної сонячної електростанції в умовах помірно-континентального клімату (м.Чернігів) та визначити енергетичну автономність системи залежно від потужності фотоелектричних панелей та ємності акумуляторної батареї.

Відповідно до даної метою ставляться такі **завдання**:

1. Провести аналітичний огляд принципів роботи, класифікації та показників ефективності теплових насосів, а також особливостей функціонування фотоелектричних станцій у холодному кліматі.
2. Виконати збір та обробку експлуатаційних даних теплового насоса приватного будинку площею 85 м² у м. Чернігові; визначити річне споживання електроенергії та сезонні коливання навантаження.
3. Визначити залежність коефіцієнта самозабезпечення комбінованої системи «фотоелектрична станція – акумулятор – тепловий насос» від потужності фотоелектричних панелей та ємності акумуляторної батареї.
4. Встановити сезонну невідповідність між виробництвом сонячної енергії та попитом теплового насоса, обґрунтувати доцільність гібридної схеми енергопостачання.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань.

Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 71 арк. формату А4,
графічна частина – 15 аркушів презентації.

Кваліфікаційна робота виконана відповідно до вимог [1].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Загальні відомості про теплові насоси

Сьогодення ставить перед людством низку викликів, пов'язаних із виснаженням викопних джерел енергії, змінами клімату та необхідністю переходу до сталого енергетичного розвитку. Відповідно до Паризької кліматичної угоди, Україна, як і більшість держав світу, взяла на себе зобов'язання щодо скорочення викидів парникових газів та підвищення енергоефективності. У цьому контексті особливу актуальність набуває використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), серед яких важливе місце посідають теплові насоси.

Тепловий насос — це термодинамічна машина, що перетворює низькопотенційну теплову енергію з довкілля (повітря, ґрунту, води) у високопотенційну теплову енергію, придатну для опалення приміщень та приготування гарячої води. За даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), теплові насоси є однією з найефективніших технологій декарбонізації сектору опалення, що забезпечує до 80% зниження викидів CO₂ порівняно з традиційними системами опалення на викопному паливі [2].

Світовий ринок теплових насосів демонструє стійке зростання. Згідно з даними бази JARN, у 2024 році світовий ринок теплових насосів типу «повітря-вода» досяг позначки 4,35 млн одиниць обладнання. Найбільшими ринками залишаються Китай, Японія та країни Європейського Союзу. Зокрема, у Японії накопичені поставки теплових насосів Eco Cute, що використовують холодоагент CO₂, перевищили 10 млн одиниць, що дозволяє уникати викидів близько 3,79 млн тон CO₂ щорічно [3].

В Україні теплові насоси також набувають дедалі більшого поширення, особливо в умовах енергетичної кризи та необхідності диверсифікації джерел енергопостачання. Згідно з Національним планом з енергетики та клімату (НПЕК) на 2025-2030 роки, потужність систем теплових насосів планується

збільшити з 291 МВт (2024 р.) до 700 МВт (2030 р.), зокрема аеротермальних насосів — з 184 до 460 МВт, геотермальних — з 69 до 160 МВт [3].

1.2 Принцип роботи теплового насоса

Принцип роботи теплового насоса базується на зворотному термодинамічному циклі, аналогічному до циклу Карно. Основна ідея полягає в тому, що тепло завжди присутнє в довкіллі — навіть у повітрі при від'ємних температурах, у верхніх шарах ґрунту чи у водоймах узимку. За допомогою механічної роботи компресора це низькопотенційне тепло можна «підняти» до температури, придатної для використання в системах опалення [2].

Основними компонентами компресійного теплового насоса є (рис. 1.1): випарник, компресор, конденсатор та розширювальний клапан. Робочим тілом циклу є холодоагент (фреон), який має низьку температуру кипіння (до -55°C), що дозволяє випаровуватись при низьких температурах джерела тепла. Цикл роботи теплового насоса складається з чотирьох основних етапів [2].



Рисунок 1.1 — Принцип роботи теплового насоса

На першому етапі рідкий холодоагент у випарнику поглинає тепло від низькопотенційного джерела (повітря, ґрунту або води) та переходить у газоподібний стан. При цьому температура холодоагенту нижча за температуру джерела тепла, що забезпечує теплообмін. На другому етапі газоподібний

холодоагент потрапляє до компресора, де відбувається його стискування. У результаті адіабатного стиснення тиск і температура холодоагенту значно підвищуються — до 90-100°C [3].

На третьому етапі гарячий газ високого тиску надходить до конденсатора, де віддає теплову енергію теплоносію системи опалення або гарячого водопостачання, конденсуючись при цьому в рідину. На четвертому етапі рідкий холодоагент проходить через розширювальний (дросельний) клапан, де його тиск і температура різко знижуються, після чого цикл повторюється. Таким чином, тепловий насос використовує електричну енергію для перенесення тепла від холоднішого тіла до теплішого, що повністю відповідає другому закону термодинаміки [2].

1.3 Класифікація теплових насосів

Теплові насоси класифікують за кількома ознаками: за типом джерела низькопотенційного тепла, за типом теплоносія в опалювальній системі, за конструктивним виконанням та за типом робочого циклу. Найбільш поширеною є класифікація за джерелом тепла та типом системи розподілу тепла (рис. 1.2) [3].

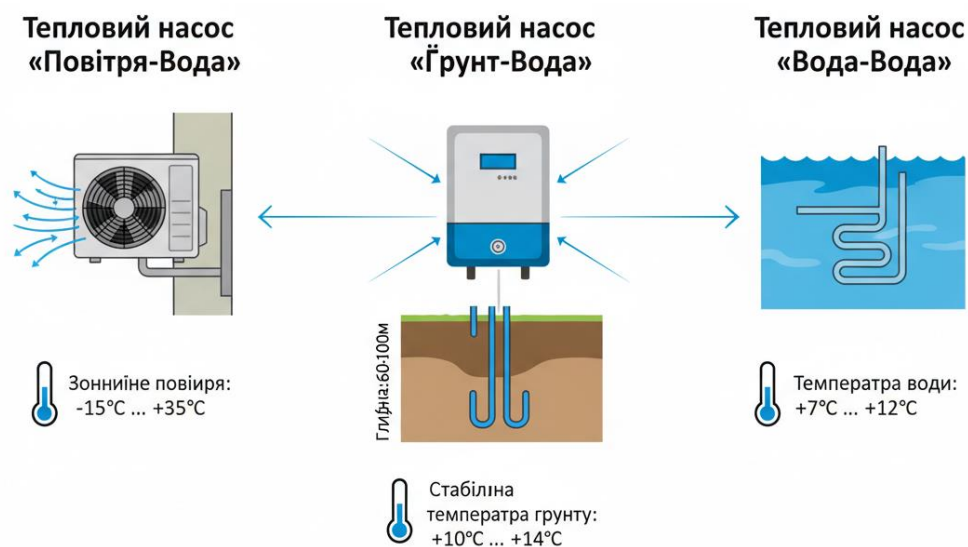


Рисунок 1.2 — Класифікація теплових насосів за джерелом тепла

За типом джерела низькопотенційного тепла розрізняють три основні

категорії теплових насосів. Аеротермальні (повітряні) теплові насоси використовують тепло атмосферного повітря. Вони найпростіші в монтажі та найдоступніші за вартістю, проте їхня ефективність знижується при низьких зовнішніх температурах. Найпоширенішими є модифікації «повітря-вода» та «повітря-повітря» [2].

Геотермальні (грунтові) теплові насоси забирають тепло з верхніх шарів ґрунту. Температура ґрунту на глибині понад 15 м залишається стабільною протягом року (+10...+12°C), що забезпечує високу та стабільну ефективність роботи. Для відбору тепла використовують вертикальні зонди (свердловини глибиною 60-100 м) або горизонтальні колектори, укладені на глибині 1,2-1,5 м. Ґрунтові теплові насоси мають найвищий сезонний коефіцієнт продуктивності, але потребують значних капіталовкладень на етапі монтажу.

Гідротермальні (водяні) теплові насоси використовують тепло водойм (озер, річок) або ґрунтових вод. Температура води в водоймах узимку зазвичай становить +4...+7°C, а ґрунтових вод — +7...+12°C. Це забезпечує сприятливі умови для роботи теплового насоса, однак використання водних ресурсів потребує відповідних дозволів.

1.4 Геотермальні теплові насоси

Геотермальні теплові насоси типу «ґрунт-вода» вважаються найефективнішими серед усіх типів. В основі їхньої роботи лежить використання стабільної температури глибинних шарів ґрунту, яка практично не залежить від сезону та становить +10...+14°C на глибині 60-100 м. Це забезпечує стабільний високий коефіцієнт перетворення COP протягом усього року [2].

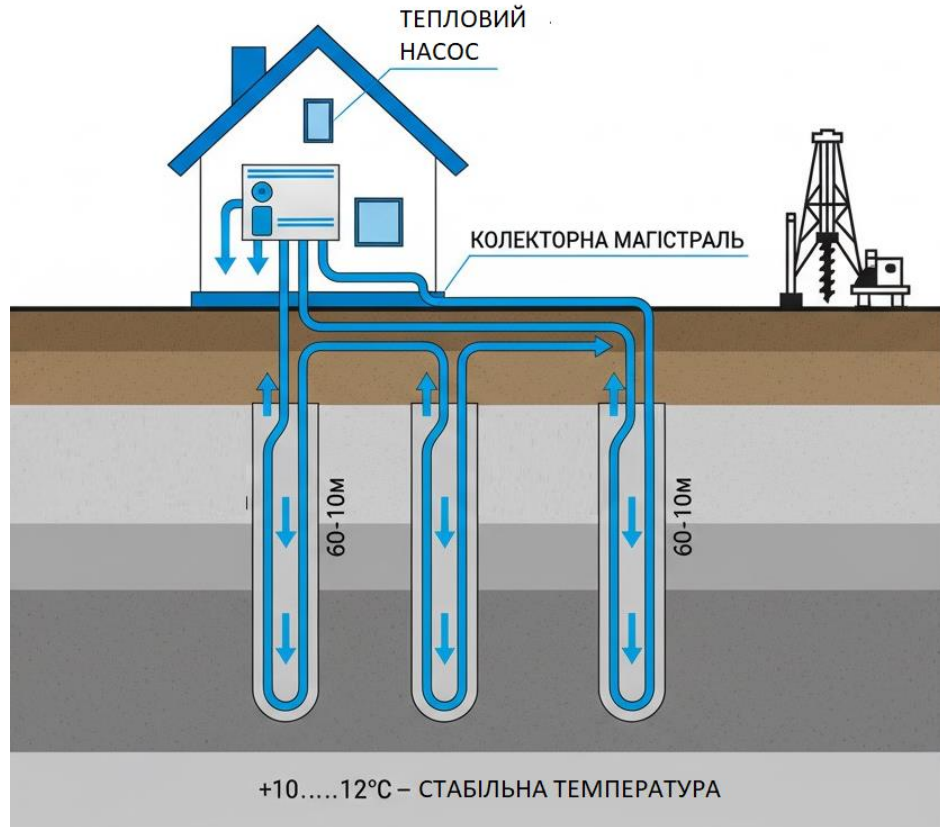


Рисунок 1.3 — Схема геотермальних вертикальних зондів

Для відбору тепла з ґрунту використовують два основні типи колекторів. Вертикальні зонди являють собою U-подібні поліетиленові труби, опущені в свердловини глибиною 40-120 м. Тепловіддача одного метра свердловини становить 30-70 Вт (середнє значення — 50 Вт). Для забезпечення теплом будинку площею 300 м² необхідна загальна довжина зондів близько 360 м (наприклад, 4 свердловини по 90 м або 6 по 60 м). Мінімальна відстань між свердловинами має становити 5-6 м для уникнення теплового впливу один на одного.

Горизонтальний ґрунтовий колектор укладається на глибині 1,2-1,5 м (нижче рівня промерзання) і потребує значної площі земельної ділянки — не менше 200 м² для типового приватного будинку. Тепловіддача горизонтального колектора залежить від типу ґрунту та коливається в межах 10-35 Вт/м². Вологий глиняний ґрунт має найкращі теплові характеристики, тоді як піщаний ґрунт значно зменшує кількість відібраного тепла.

Як теплоносій у ґрунтових контурах використовують незамерзаючі

розчини на основі пропіленгліколю або етиленгліколю (температура замерзання -15°C). Циркуляційні насоси забезпечують рух розчину по замкнутому контурі між геотермальним полем та тепловим насосом. Термін служби якісно виготовлених ґрунтових зондів перевищує 50 років, що робить їх надійною довгостроковою інвестицією.

1.5 Теплові насоси для систем опалення та гарячого водопостачання

Теплові насоси можуть забезпечувати як опалення приміщень, так і приготування гарячої води для побутових потреб (ГВП). Залежно від призначення та архітектури будівлі застосовують різні схеми підключення та типи теплоносіїв. Найбільш ефективно теплові насоси працюють у низькотемпературних системах опалення, таких як водяна тепла підлога (температура подачі $35\text{-}45^{\circ}\text{C}$) або настінні конвектори.

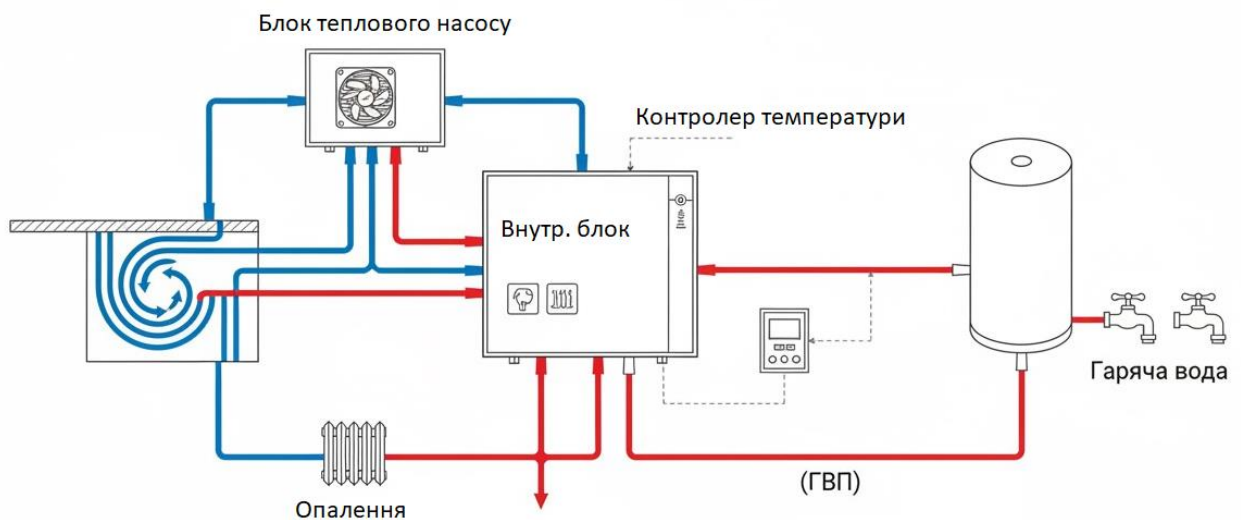


Рисунок 1.4 — Схема системи опалення та гарячого водопостачання з тепловим насосом

Для приготування гарячої води використовують накопичувальні бойлери зі спіральним теплообмінником або зовнішнім нагрівачем. Температура гарячої води, необхідна для побутових потреб, становить $55\text{-}60^{\circ}\text{C}$, що вище за оптимальну температуру подачі системи опалення. Тому для систем ГВП часто

застосовують окремі теплообмінники або комбіновані ємності з електричними тенами для догріву води до потрібної температури [4].

За режимом роботи системи ГВП розрізняють моновалентну, моноенергетичну та бівалентну схеми. У моновалентному режимі тепловий насос є єдиним джерелом тепла і повинен забезпечувати температуру подачі до 70°C. У моноенергетичному режимі основне навантаження покриває тепловий насос, а пікові навантаження — електронагрівальна вставка в бойлері. Це найефективніша схема для більшості застосувань. У бівалентному режимі використовують два незалежні теплогенератори, що працюють по черзі або паралельно.

При проектуванні систем ГВП важливо враховувати гігієнічні вимоги. Відповідно до норм Євросоюзу, температура подачі гарячої води має становити не менше 60°C для запобігання розмноженню легіонелли. Для установок великої потужності (бойлер понад 400 л) необхідна також циркуляція гарячої води з температурою зворотного потоку не нижче 55°C.

1.6 Показники ефективності теплових насосів

Основним показником ефективності теплового насоса є коефіцієнт перетворення COP (Coefficient of Performance), який визначається як відношення виробленої теплової потужності до спожитої електричної потужності: $COP = Q/E$, де Q — теплова потужність, кВт; E — електрична потужність, кВт. Значення COP завжди більше одиниці, що відрізняє тепловий насос від прямих електронагрівачів, де $COP \approx 1$ [4].

Коефіцієнт COP залежить від температури низькопотенційного джерела та температури теплоносія в системі опалення. Чим вища температура джерела та чим нижча температура подачі, тим вищий COP. Саме тому низькотемпературні системи опалення (тепла підлога) є найбільш ефективними для роботи з тепловими насосами. Для порівняння теплових насосів різних типів використовують стандартні робочі точки.

Таблиця 1.1 — Стандартні робочі точки та середні значення COP

Тип теплового насоса	Робоча точка	Температура джерела	Середній COP
Повітря-Вода	A2W35	Повітря -2°C	3,2
Ґрунт-Вода	B0W35	Розсіл 0°C	4,3
Вода-Вода	W10W35	Вода +10°C	5,4
Повітря-Вода	A7W55	Повітря +7°C	2,7

Для оцінки ефективності роботи теплового насоса протягом опалювального сезону використовують сезонний коефіцієнт продуктивності SPF (Seasonal Performance Factor). Цей показник враховує зміну COP у різних режимах роботи та дає реалістичнішу оцінку економічності системи. Формула розрахунку SPF має вигляд: $SPF = \sum Q_{Hi} / \sum E_{Hi}$, де Q_{Hi} — кількість виробленої теплової енергії за місяць i , кВт·год; E_{Hi} — кількість спожитої електроенергії за місяць i , кВт·год; n — кількість місяців опалювального сезону.

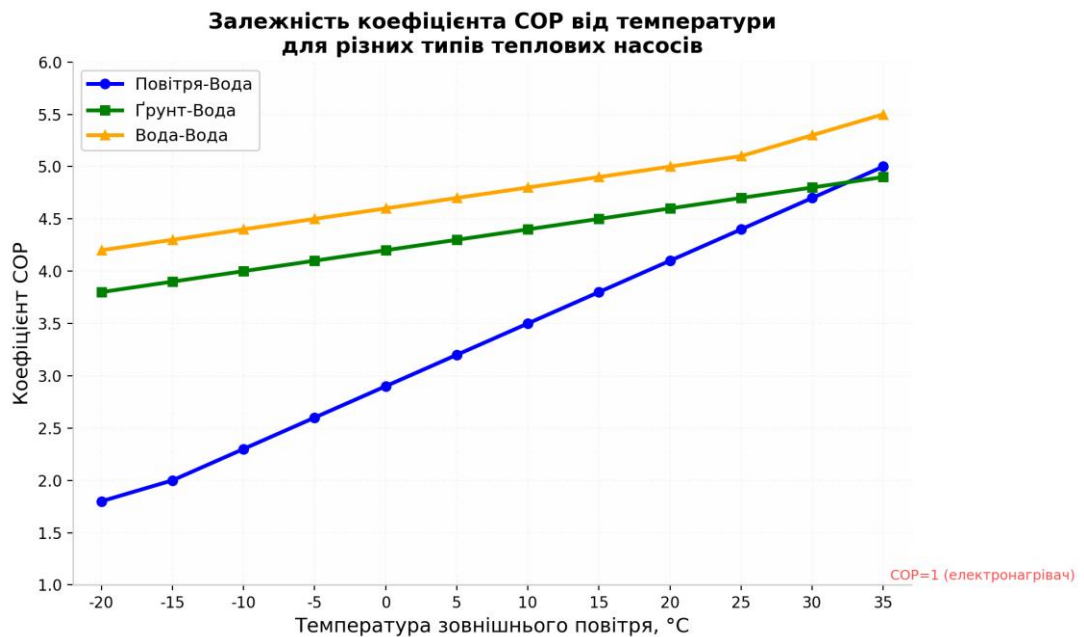


Рисунок 1.5 — Залежність коефіцієнта COP від температури для різних типів теплових насосів

Як видно з рисунка 1.5, теплові насоси типу «вода-вода» та «ґрунт-вода» мають найвищий та найстабільніший COP завдяки сталій температурі джерела тепла. Теплові насоси «повітря-вода» демонструють більш низький COP при низьких зовнішніх температурах, що пояснюється сезонними коливаннями температури повітря. Проте в м'якому кліматі з відносно теплою зимою вони є

економічно доцільним рішенням.

1.7 Сучасний стан та перспективи розвитку теплових насосів

Світова індустрія теплових насосів активно розвивається, впроваджуючи нові технології для підвищення ефективності та розширення діапазону робочих температур. Одним із ключових напрямів є використання інверторних компресорів, які дозволяють плавно регулювати продуктивність від 20% до 100% відповідно до поточного теплового навантаження. Це значно підвищує сезонну ефективність та скорочує споживання електроенергії [3].

Важливим технічним досягненням є використання компресорів з додатковим упорскуванням пари (vapor injection), що дозволяє тепловим насосам «повітря-вода» ефективно працювати при температурах до -25°C . Ця технологія збільшує теплову потужність на 10-30% та розширює діапазон робочих температур. Сучасні моделі теплових насосів здатні нагрівати теплоносії до $65-75^{\circ}\text{C}$, що робить їх сумісними з традиційними радіаторними системами опалення.

У сфері холодоагентів спостерігається перехід від традиційних фреонів (R410A) до більш екологічних альтернатив: R32, що має на 68% нижчий потенціал глобального потепління (GWP), та CO₂ (R744), який використовується в японських системах Eco Cute. Останні досягають температури гарячої води до 90°C , що робить їх ідеальними для комерційних застосувань.

В Україні розвиток ринку теплових насосів стимулюється державною політикою енергетичної трансформації. У вересні 2024 року Державне агентство з енергоефективності створило ПрАТ «Фонд декарбонізації», який надає пільгові кредити під 9% річних для встановлення теплових насосів, сонячних панелей та іншого енергоефективного обладнання. За перші чотири місяці 2024 року Фонд виділив 181 млн грн на 17 проєктів.

Перспективи використання теплових насосів в Україні є значними,

особливо в контексті заміщення газового опалення та розвитку децентралізованих енергетичних систем. Згідно з НПЕК, до 2030 року частка ВДЕ у кінцевому споживанні енергії має зрости до 27,1%, а теплові насоси відіграватимуть у цьому важливу роль. Зокрема, передбачається збільшення використання енергії від теплових насосів з 291 ГВт·год (2024 р.) до 700 ГВт·год (2030 р.).

1.8 Аналіз досвіду запровадження сонячної фотоелектричної системи електропостачання для живлення теплових насосів

У новітніх наукових працях підкреслюється зростаюча роль автономних сонячних фотоелектричних систем, інтегрованих з тепловими насосами та акумуляторними батареями, як екологічного рішення для опалення житлових будинків, особливо в холодних регіонах. Дослідження показує, що сонячні фотоелектричні системи мають менший вплив на довкілля та клімат порівняно з традиційними джерелами енергії на основі викопного палива; середній рівень викидів для фотоелектричних систем становить 0,044 кг еквіваленту CO₂/кВт·год. З роками ефективність сонячних панелей поступово покращувалася. Наприклад, у 2018 році ефективність панелей зросла приблизно на 5% порівняно з попередніми роками, тобто з близько 17,7% до приблизно 18,6% [5-7]. У перспективі до 2025 року очікується, що ефективність зросте приблизно на 15% і досягне близько 24,2%. Однак важливо зазначити, що в лабораторіях вже досягнуто ще вищих рівнів ефективності завдяки використанню передових технологій, таких як тандемні сонячні елементи. Нещодавні наукові дослідження підкреслили вражаючий потенціал тандемних сонячних елементів на основі перовськіту, особливо в поєднанні з традиційним кремнієм. Такі тандемні конфігурації можуть досягти ефективності перетворення енергії понад 40%. Зокрема, прогнозується, що ефективність перовскіт-кремнієвих тандемів досягне 42%, якщо врахувати такі фактори, як люмінесцентне зчеплення. Це значне поліпшення порівняно зі стандартними

одноперехідними кремнієвими сонячними панелями, які зазвичай працюють з ефективністю близько 20% [8-12]. Дослідження Сахи підкреслює важливість децентралізованих сонячних фотоелектричних систем для підвищення енергетичної безпеки шляхом забезпечення надійного доступу до електроенергії без залежності від централізованої інфраструктури енергомережі.

Однією з найкращих переваг сонячних панелей є те, що вони чудово підходять для децентралізованого виробництва електроенергії, тобто електроенергію можна генерувати саме там, де вона потрібна, наприклад, у будинку [13]. Це допомагає людям, які знаходяться далеко від основної електромережі, отримати доступ до електроенергії, особливо у віддалених або сільських районах. Але також важливо знати, що ефективність сонячних панелей може знижуватися, коли погодні умови не є ідеальними. Наприклад, вони не можуть виробляти стільки електроенергії в похмурі дні, при слабкому сонячному світлі або коли панелі забруднені чи знаходяться в тіні. Швидкість вітру, дощ, снігопад, вологість та пил також можуть впливати на ефективність їх роботи [5,9,12]. Ці виклики враховуються під час проектування системи, щоб забезпечити достатню кількість енергії протягом року. Інтеграція акумуляторних батарей з фотоелектричними системами та тепловими насосами широко досліджується з метою підвищення надійності енергопостачання та продуктивності системи. Наприклад, автори в [14] показали, що системи акумуляторних батарей є більш енергоефективними, ніж системи зберігання водню в житлових умовах. У дослідженні повідомляється, що батареї досягли загальної ефективності системи 7,8% для конфігурації з батареями та 5,4% для водневої системи. Ці значення відображають сукупну продуктивність усього процесу «сонячна батарея-зберігання-навантаження», а не лише ефективність батареї в режимі «туди-назад». Це значною мірою пов'язано з тим, що акумуляторні системи працюють за простішим і більш прямим процесом. Електроенергія накопичується хімічним шляхом, а потім перетворюється назад із мінімальними втратами енергії. Натомість накопичення водню передбачає

кілька етапів перетворення енергії: спочатку електроенергія використовується для виробництва водню шляхом електролізу, потім водень стискається та накопичується, і нарешті, він перетворюється назад на електроенергію за допомогою паливного елемента. Кожен із цих етапів спричиняє втрати енергії, що робить весь процес менш ефективним. Хоча накопичення водню може мати переваги з точки зору вартості або екологічних аспектів, акумулятори загалом краще підходять для житлових об'єктів, де важливі висока ефективність та надійність. Аналогічно, автор [4] зазначив, що поєднання акумуляторів з тепловими насосами покращує продуктивність системи та зменшує потребу в резервному живленні. Ці системи особливо важливі в автономних сценаріях або районах із високим сезонним попитом, оскільки акумулятори накопичують надлишкову енергію в сонячні періоди та вивільняють її в похмурі або зимові дні. Сезонна енергоефективність є ще одним ключовим фактором у проектуванні систем. Lundh і Dalenback досліджували сезонне накопичення теплової енергії у Швеції, використовуючи підземні породи для накопичення літнього сонячного тепла для використання взимку. Хоча такі системи є ефективними, вони часто занадто дорогі та великі для типових домогосподарств. Натомість, все більше досліджень підтримують оптимізацію розміру та стратегій управління комбінаціями фотоелектричних систем, акумуляторів та теплових насосів для цілорічної ефективності.

Теплові насоси, особливо системи «повітря-вода», стають дедалі популярнішими в північних кліматичних умовах. Ці системи витягують тепло з навколишнього середовища навіть при температурах нижче 0 °C і використовують його для опалення помешкань та нагріву води. Нещодавнє експериментальне дослідження [2] показало, що система теплового насоса на сонячній енергії, яка використовується для опалення будинків у Китаї, досягала ефективності збору тепла до 93% протягом дня. Це означає, що система була здатна захоплювати та використовувати значну частину сонячної енергії для опалення. Поєднуючи виробництво електроенергії та збір тепла в одній системі, конфігурація PV/T допомогла покращити загальну ефективність, що робить її

хорошим варіантом для задоволення потреб у опаленні та гарячій воді в будинках. Однак досягнення такої ефективності для півночі України взимку вимагає підтримки акумуляторів відповідної ємності через зменшену доступність сонячної енергії в холодні місяці. Незважаючи на зростаючу кількість досліджень, більшість з них значною мірою покладаються на моделювання, а не на реальні експлуатаційні дані.

1.9 Висновки до розділу

1. Тепловий насос є високоефективною технологією перетворення низькопотенційної теплової енергії навколишнього середовища у високопотенційну енергію для системи опалення та гарячого водопостачання.

2. За типом джерела тепла розрізняють аеротермальні (повітряні), геотермальні (грунтові) та гідротермальні (водяні) теплові насоси. Кожен тип має свої переваги та обмеження, що визначають його доцільність у конкретних умовах експлуатації.

3. Геотермальні теплові насоси типу «грунт-вода» демонструють найвищу ефективність (COP до 5,0) завдяки стабільній температурі ґрунту на глибині 60-100 м, проте потребують значних початкових інвестицій на буріння свердловин.

4. Для систем гарячого водопостачання застосовують моновалентні, моноенергетичні та бівалентні схеми, при цьому моноенергетичний режим з електричним догрівом є найбільш ефективним для типових застосувань.

5. Коефіцієнт ефективності COP теплових насосів коливається в діапазоні 2,0-5,5 залежно від типу та умов експлуатації, що значно перевищує ефективність прямих електронагрівачів (COP \approx 1).

6. В Україні передбачається стрімке зростання використання теплових насосів — від 291 МВт (2024 р.) до 700 МВт (2030 р.), що підтримується державними програмами фінансування та європейськими зобов'язаннями щодо декарбонізації.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Потреба в опаленні в холодному кліматі

У житлових будівлях потреба в опаленні складається переважно з двох частин: опалення приміщень (SH) та гаряче водопостачання (DHW). У Європі будівлі споживають значну частку енергії: близько 79% припадає на SH та DHW. Наприклад, у Данії опалення становить понад чотири п'ятих енергоспоживання в типовому будинку на SH та DHW. Таку саму тенденцію можна спостерігати в багатьох інших холодніших регіонах, таких як Швеція, Фінляндія, Ісландія та частини Східної Європи й Північного Китаю, де приблизно половина всіх будівель отримує опалення та гарячу воду з мереж централізованого опалення. У скандинавських регіонах, таких як Швеція, попит на опалення має яскраво виражений сезонний характер: найбільші навантаження припадають на зиму, а влітку потреба в опаленні приміщень дуже мала.

Теплова потужність будівлі в основному визначається різницею між температурою всередині та зовні, оскільки тепло постійно втрачається через огорожувальні конструкції будівлі. Потребу в опаленні приміщень можна виразити таким чином:

$$\dot{Q}_{SH} = \sum U \cdot A (T_{in} - T_{out}) \quad (2.1)$$

де U - загальний коефіцієнт теплопередачі (Вт/м²К);

A - площа поверхні кожного елемента огорожуючих конструкцій (м²);

T_{in} - бажана температура всередині приміщення (°С);

T_{out} - температура зовнішнього повітря (°С).

Рівняння (2.1) показує, що потреба в опаленні лінійно зростає із зниженням температури зовнішнього повітря.

Що стосується гарячого водопостачання, потреба в ньому менш чутлива до зовнішніх умов і може бути приблизно виражена як:

$$\dot{Q}_{DHW} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{set} - T_{inlet}) \quad (2.2)$$

де m - маса спожитої води (кг/с);
 C_p - питома теплоємність води (кДж/кг·К);
 T_{Set} - температура гарячої води на виході (°C);
 T_{inlet} - температура води на вході (°C).

Оскільки T_{inlet} взимку нижча, потреба в теплі для DHW дещо вища в холодні місяці, але залишається досить постійною порівняно з опаленням приміщень.

Отже, загальна потреба в опаленні виражається як сума потреби в опаленні приміщень та гарячій воді для побутових потреб.

$$Q_{TOTAL} = \dot{Q}_{SH} + \dot{Q}_{DHW} \quad (2.3)$$

При визначенні розрахункової зимової температури зовнішнього повітря (DVUT) також враховується часова постійна будівлі, яка відображає, наскільки добре будівля зберігає тепло. Більш масивні будівлі з вищою тепловою масою можуть ефективніше компенсувати короточасні перепади температури, що потенційно дозволяє використовувати дещо вищу DVUT у розрахунках.

2.2 Аналіз роботи теплового насоса «повітря-вода»

Тепловий насос «повітря-вода» — це екологічна та енергоефективна система, яка переносить тепло з навколишнього повітря у воду, забезпечуючи опалення приміщень та гаряче водопостачання. Ця технологія є особливо ефективною в добре утеплених будинках і набирає популярності в холодних регіонах, завдяки своїй пристосованості до холоднішого клімату.

Тепловий насос «повітря-вода» працює за принципом холодильного циклу стиснення пари, який включає чотири основні компоненти:

Випарник: Ця частина забирає тепло з зовнішнього повітря, перетворюючи холодоагент на газ.

Компресор: він стискає газоподібний холодоагент, підвищуючи його температуру та тиск.

Конденсатор: цей компонент передає тепло від гарячого газоподібного холодоагента до води в системі опалення, внаслідок чого холодоагент знову перетворюється на рідину.

Розширювальний клапан: Цей клапан знижує тиск рідкого холодоагенту, що призводить до випаровування при нижчому тиску. В результаті випаровування холодоагент охолоджується, оскільки під час цієї фазової зміни явне тепло перетворюється на приховане тепло. Цей цикл дозволяє системі ефективно передавати тепло навіть у холодніших умовах.

Нижче наведено основні рівняння, що допомагають зрозуміти принцип роботи теплового насоса та оцінити його ефективність.

$$Q_L + W = Q_H \quad (2.4)$$

Це означає, що тепло, взяте з зовнішнього повітря (Q_L), плюс електрична енергія, спожита компресором (W), дорівнює загальному теплу, переданому до внутрішньої водяної системи (Q_H).

У теплових насосах найважливішим параметром, що характеризує систему, є COP — коефіцієнт корисної дії, тобто відношення необхідного теплового потоку до роботи, необхідної компресору. COP для циклу нагрівання можна визначити як

$$COP = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_L + W}{W} \quad (2.5)$$

і він описує, наскільки ефективно електроенергія, що споживається компресором, перетворюється на корисну теплову потужність.

Ентальпія (H) вказує на загальний тепловий вміст системи і визначається як:

$$H = U + \rho V \quad (2.6)$$

де U - внутрішня енергія;

ρ - тиск;

V - об'єм. У теплових насосах ентальпія допомагає кількісно оцінити тепло, що поглинається або виділяється під час фазових переходів холодоагенту, особливо у випарнику та конденсаторі [15].

Ентропія (S) вимірює рівень безладу або випадковості в системі. У термодинаміці вона пов'язана з другим законом, що показує напрямок спонтанних процесів та межі перетворення енергії. У теплових насосах аналіз ентропії важливий для виявлення незворотних процесів та підвищення ефективності.

Наприклад, утворення ентропії в таких компонентах, як компресори, може свідчити про втрати енергії через такі фактори, як турбулентність та в'язкі ефекти. Дослідження показують, що утворення ентропії є найвищим поблизу кінчиків лопаток у компресорах, що вказує на зони, де зміни конструкції можуть зменшити втрати.

У контексті теплових насосів ентальпія та ентропія є ключовими термодинамічними властивостями, необхідними для аналізу та покращення продуктивності системи. Ці властивості допомагають зрозуміти перетворення енергії та оцінити ефективність циклів теплового насоса.

2.3 Залежність COP теплового насосу від температури

COP теплового насоса значною мірою залежить від температури зовнішнього повітря. Зі зниженням температури зовнішнього повітря випарник працює в більш складних умовах, і компресор має працювати інтенсивніше, щоб забезпечити ту саму потужність опалення. Як наслідок, COP знижується взимку. Коли температура зовнішнього повітря помірна, компресор виконує менше роботи, що призводить до підвищення COP.

Теоретична верхня межа COP визначається коефіцієнтом Карно:

$$\eta = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad (2.7)$$

де η – COP;

T_H - температура повітря в приміщенні;

T_L - температура зовнішнього повітря.

Хоча реальні теплові насоси не можуть досягти цієї ідеальної межі через

втрати в системі, той самий принцип пояснює, чому COP нижчий при великих перепадах температур.

2.4 Робота сонячної фотоелектричної панелі

Електроенергія виробляється фотоелектричними модулями, які іноді називають сонячними панелями. Їхнє стійке джерело енергії зменшує забруднення та потребу у викопному паливі. Значні досягнення у фотоелектричній технології протягом останніх десятиліть зробили її доступною, ефективною та широко використовуваною. Сьогодні вона забезпечує енергією дахи будинків, транспортні засоби, автономні системи для повсякденних потреб, великі сонячні електростанції та інші застосування.

Сонячна панель складається з різних шарів, які працюють разом, щоб уловлювати сонячне світло та перетворювати його на електроенергію [16-18]. Зверху розташована алюмінієва рама, яка надає панелі міцності та захисту. Прямо під рамою знаходиться загартоване скло, яке є міцним та прозорим. Воно захищає сонячні елементи від дощу, вітру та пилу, водночас пропускаючи сонячне світло.

Під склом знаходиться шар, який називається EVA (етиленвінілацетат), що утримує та захищає сонячні елементи. Сонячні елементи розташовані посередині і є найважливішою частиною, оскільки саме вони перетворюють сонячне світло на електроенергію. Ще один шар EVA розміщений під елементами, щоб забезпечити їх безпеку та надійне закріплення всередині панелі.

Найнижчим захисним шаром є задня плівка, яка ізолює панель та захищає її від вологи та інших несприятливих факторів навколишнього середовища. Нарешті, ззаду прикріплена розподільна коробка, яка слугує електричним інтерфейсом, де зібрана електроенергія направляється для зовнішнього використання. Разом ці компоненти працюють злагоджено, щоб забезпечити ефективну та надійну роботу сонячної панелі протягом усього терміну її

експлуатації.

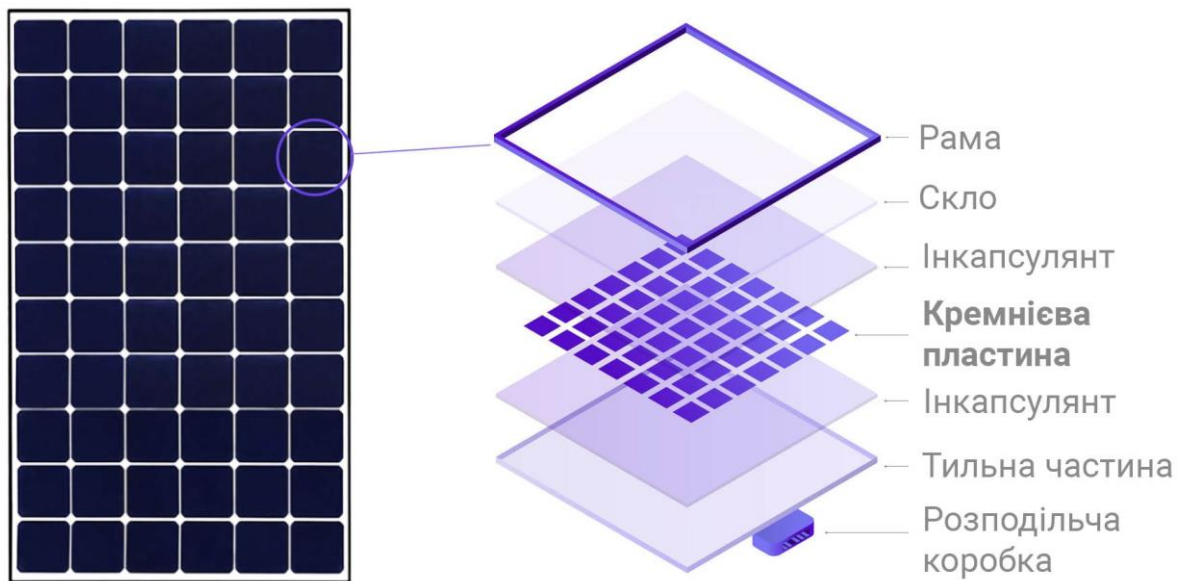


Рисунок 2.2 - Будова сонячної панелі

2.5 Принцип роботи фотоелектричної системи

Функціонування сонячної панелі базується на добре відомому науковому принципі, відомому як фотоелектричний ефект. Цей ефект описує процес, за допомогою якого сонячне світло безпосередньо перетворюється на електрику [8,9] з використанням напівпровідникових матеріалів, найчастіше кремнію. В основі цього процесу лежить сонячна комірка — пристрій, здатний уловлювати сонячну енергію та перетворювати її на потік електричного струму.

Кожна сонячна комірка є діодом з р-п-переходом — типом електронного компонента, виготовленого з двох шарів кремнію з різним легуванням: р-типу (позитивного) та n-типу (негативного), де перетворення світла на струм відбувається у переході .

Роботу сонячної панелі можна розділити на три етапи: генерація носіїв заряду, їх розділення в переході та їх остаточний збір на виводах.

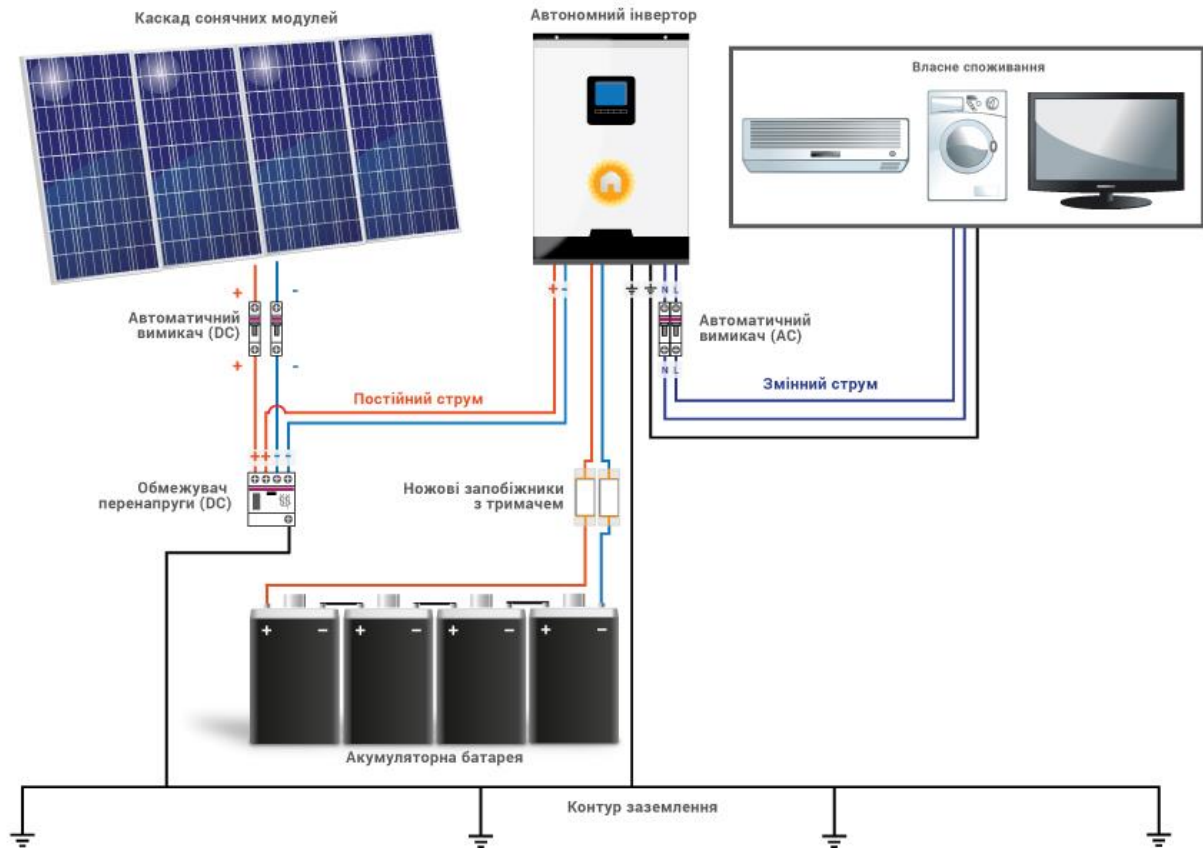


Рисунок 2.3 - Принцип роботи сонячної системи електроживлення

2.6 Ефективність фотоелектричної системи

В середньому, сонячні панелі для житлових будинків працюють з ефективністю приблизно від 18% до 24%. Кількість електроенергії, яку вони виробляють у будь-який момент часу, залежить від трьох ключових факторів: загальної площі поверхні панелей, рівня сонячного світла, яке вони отримують, також відомого як сонячна інтенсивність, та власної ефективності панелей [12].

Ефективність фотоелектричного модуля визначається як:

$$\eta_{PV} = \frac{E_{PV\ OUTPUT}}{G \cdot A} \quad (2.8)$$

де η_{PV} - ефективність фотоелектричної системи (%);

$E_{PV\ OUTPUT}$ - кількість електроенергії, виробленої панелями (кВт·год);

G - сонячна інтенсивність (кВт·год/м²);

A - площа фотоелектричної панелі (m^2).

Добова потужність фотоелектричної системи розраховується за формулою:

$$E = P_p \cdot I \cdot PR \quad (2.9)$$

де P_p - номінальна пікова потужність фотоелектричної системи (кВт), яка залежить від ефективності панелі, загальної площі та стандартної інтенсивності сонячного випромінювання під час випробувань (зазвичай $1000 \text{ Вт}/m^2$);

I - інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні (кВт·год/ m^2 на добу);

PR - коефіцієнт корисної дії системи.

У регіонах з високою широтою кількість сонячного випромінювання, що надходить на поверхню Землі, значно змінюється протягом року. Вона набагато нижча в зимові місяці та значно вища влітку. Ці сезонні відмінності вже є вираженими і, як очікується, стануть ще більш екстремальними в майбутньому через триваючі кліматичні зміни.

2.7 Система акумулювання енергії в батареях (BESS)

У даному проекті акумулятори вважаються одним із найбільш придатних варіантів накопичення енергії завдяки їхній ефективності та потенціалу для зменшення експлуатаційних викидів. Однак їхнє виробництво та утилізація становлять екологічні виклики. У цьому дослідженні розглядається літій-іонний акумулятор завдяки його сприятливим характеристикам, таким як висока робоча напруга елементів, низький рівень саморозряду, зменшене забруднення та висока питома потужність, а також відносно низькі експлуатаційні викиди порівняно з іншими типами акумуляторів. Ці переваги зумовлюють їх широке використання в портативних пристроях, гібридних електромобілях та промислових застосуваннях [19,20,21]. Система акумулювання енергії в батареях підвищує самозабезпеченість, накопичуючи надлишкову фотоелектричну електроенергію для подальшого використання,

коли сонячна енергія недоступна [22-24].

SOC акумулятора в будь-який момент часу описується таким чином:

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \eta_{ch} \cdot P_{ch,t} - \frac{P_{dis,t}}{\eta_{dis}} \quad (2.10)$$

де SOC_t - стан заряду в момент часу t ,

$P_{ch,t}$ та $P_{dis,t}$ - потужність заряджання та розряджання;

η_{ch} та η_{dis} - коефіцієнти корисної дії заряджання та розряджання.

Оцінка стану акумулятора також називається рівнем заряду (SOC). Однією з головних проблем при використанні акумуляторів є оцінка SOC. SOC вказує, скільки ємності залишилося в акумуляторі, і є ключовим фактором для моніторингу та контролю. Оскільки SOC безпосередньо впливає на продуктивність акумулятора, важливо оцінювати його точно. Надійна оцінка SOC допомагає запобігти надмірному розрядженню, подовжує термін служби акумулятора та дозволяє застосовувати кращі стратегії управління енергією в системах [25].

Коефіцієнт самозабезпечення (SSR) є ключовим показником для автономних систем і визначається як:

$$SSR = \frac{E_{PV,battery}}{E_{total\ load}} \quad (2.11)$$

Цей коефіцієнт виражає відсоток річного споживання електроенергії будівлею, що задовольняється без підтримки мережі.

Взимку інсоляція низька, тому потрібна надмірно велика фотоелектрична система. В результаті акумулятор часто розряджається. Натомість влітку висока інсоляція забезпечує значне виробництво фотоелектричної енергії. Це дозволяє тривалий час підтримувати акумулятор майже повністю зарядженим.

2.8 Місцезнаходження об'єкту елеткро- і теплопостачання

Для аналізу можливості використання фотоелектричної станції для живлення теплового насосу приватного будинку виберемо найбільш північніше розташування будинку в Чернігівській області. Протягом зимових місяців, з листопада по березень, температура тут часто опускається нижче нуля. Середньодобові температури коливаються в діапазоні від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$, з періодичними зниженнями нижче $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ у найхолодніші періоди. Ці умови зумовлюють необхідність опалення будинків та нагріву побутової гарячої води. Завдяки цьому це гарне місце для тестування ефективності роботи систем теплових насосів та їх енергоефективності протягом року.

Щоб гарантувати, що системи опалення зможуть підтримувати комфортну температуру в приміщеннях у найхолодніші періоди, будівлі проєктуються на основі Design winter outdoor temperature (DVUT). Цей показник відображає зовнішню температуру, яка статистично перевищується лише кілька разів на рік, і використовується для визначення необхідної теплової потужності. Для Чернігівської області DVUT становить приблизно $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Натомість літо, з червня по серпень, є відносно м'яким. Завдяки цьому помірному клімату охолодження, як правило, не потрібне, а попит на енергію протягом цих місяців обмежується переважно використанням гарячої води.

На рисунку 2.4 показано середню кількість годин сонячного світла на добу та відповідну доступність сонячної енергії. Кількість сонячного світла поступово збільшується з січня, досягаючи піку в червні, а потім зменшується до грудня.

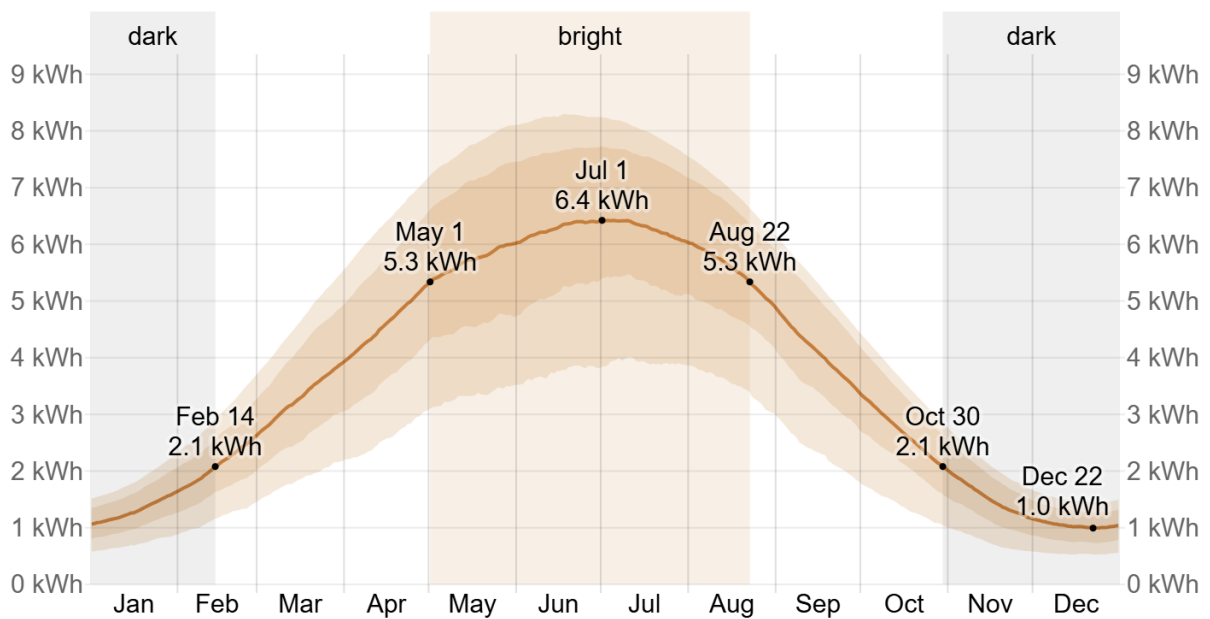


Рисунок 2.4 - Середня кількість сонячних годин на добу та виробництво сонячної енергії в м. Чернігів [26]

Виробництво сонячної енергії має подібну динаміку: максимальна потужність спостерігається наприкінці весни та на початку літа, а мінімальна — у зимові місяці. Ця чітка кореляція підкреслює залежність виробництва сонячної енергії від наявності сонячного світла та наголошує на важливості врахування сезонних особливостей під час проектування фотоелектричних систем та планування рішень для накопичення енергії.

2.9 Опис будинку

Це дослідження було проведено на прикладі реального житлового будинку в Чернігові, показаного на рисунку 2.5, де встановлено систему теплового насоса «повітря-вода». Обраний будинок послужив практичним прикладом для оцінки поведінки системи, моделей споживання енергії та ефективності роботи теплового насоса в різні пори року. Будівля, що підлягала моніторингу, — це односімейний будинок із загальною опалювальною площею 85 квадратних метрів.

Він є типовим зразком скандинавської житлової архітектури з помірною теплоізоляцією та значною сезонною потребою в опаленні.



Рисунок 2.5 - Житловий будинок, розташований у місті Чернігів

Будинок складається з:

Вітальні, кухні, двох спальень, ванної кімнати та передпокою. Настінного зовнішнього блоку теплового насоса на рівні землі, підключеного до внутрішньої системи.

2.10 Опис системи теплового насосу

NIBE F2050-6 — це тепловий насос «повітря-вода», який забезпечує максимальну теплову потужність близько 6 кВт за стандартних умов випробувань. Система, що використовується в цьому дослідженні, включає модуль управління NIBE SMO S40, який підключається до платформи myUplink через інтернет. Цей модуль виконує функцію центрального контролера системи теплового насоса та взаємодіє з кількома ключовими

компонентами, зокрема:

- Зовнішній блок теплового насоса (NIBE F2050-6 кВт)
- Внутрішні датчики температури
- Датчики бака гарячої води
- Обладнання для обліку енергії
- Пристрої Smart Plug (використовуються для вимірювання або керування конкретними навантаженнями)
- Тепло, що подається системою, розподіляється по всьому будинку за допомогою водяного контуру радіаторів, забезпечуючи рівномірне опалення в різних кімнатах.



Рисунок 2.6 - Система теплового насоса NIBE F2050-6KW

2.11 Збір даних

У цьому проекті експлуатаційні дані системи теплового насоса були зібрані за допомогою платформи NIBE myUplink, як показано на рисунку 2.7. Це хмарна цифрова служба, розроблена компанією NIBE Energy Systems, призначена для надання користувачам віддаленого доступу до моніторингу та управління їх системами опалення та клімат-контролю. Вона підтримує

відстеження стану системи в режимі реального часу, реєстрацію даних та інтелектуальний аналіз енергоспоживання [27]. Для основного аналізу досліджень було безпосередньо вилучено з платформи myUplink дані за один рік, які реєструються з нерегулярними інтервалами часу, причому проміжки між вимірами коливаються від кількох хвилин до десяти годин. Щоб забезпечити узгодженість аналізу, дані передискретизуються та об'єднуються у середньодобові значення.

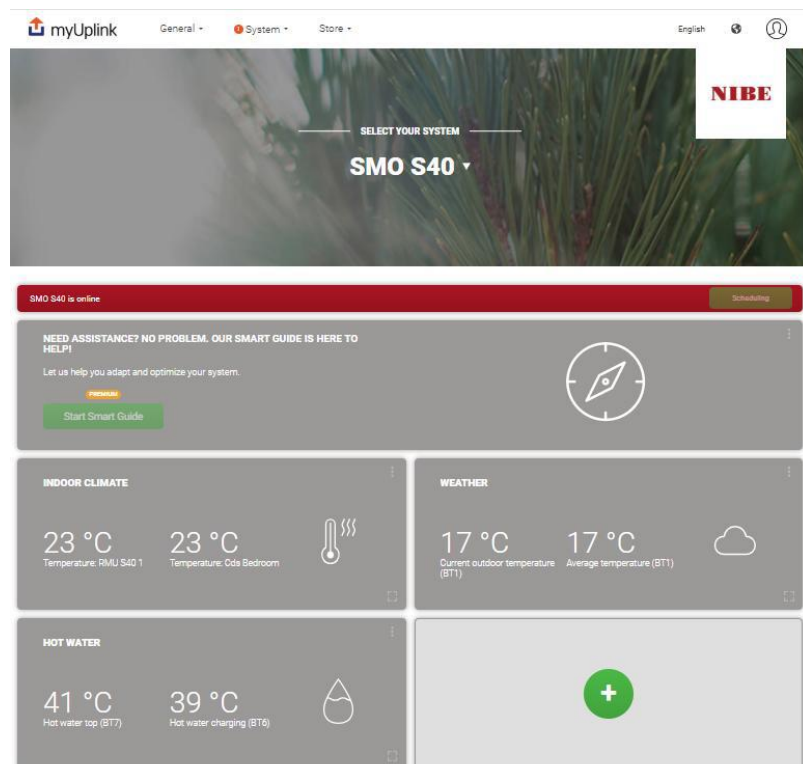


Рисунок 2.7 - Панель myUplink з даними про температуру всередині приміщення, гарячу воду та погоду

Це передискретизування виконується в MATLAB шляхом вирівнювання всіх змінних за загальною часовою базою та усереднення доступних вимірювань за 48-годинний період, що дає узгоджений набір даних, придатний для подальшого моделювання та порівняння. Ці дані включали щоденні записи щодо:

- Температури всередині та зовні приміщення (°C);
- Споживання енергії компресором опалення;
- Споживання енергії компресором гарячої води.

Набір даних з платформи myUplink містить щоденні записи температури всередині та зовні приміщення, а також споживання енергії на опалення та гарячу воду в період з 15 березня 2024 року по 19 лютого 2025 року.

Кожна змінна вимірюється з високою точністю, а дані обробляються у вигляді щоденних середніх значень та підсумків, щоб чітко показати сезонні тенденції. На рисунку 2.8 показано ці коливання, що ілюструють, як змінюється попит на опалення та гарячу воду протягом року.

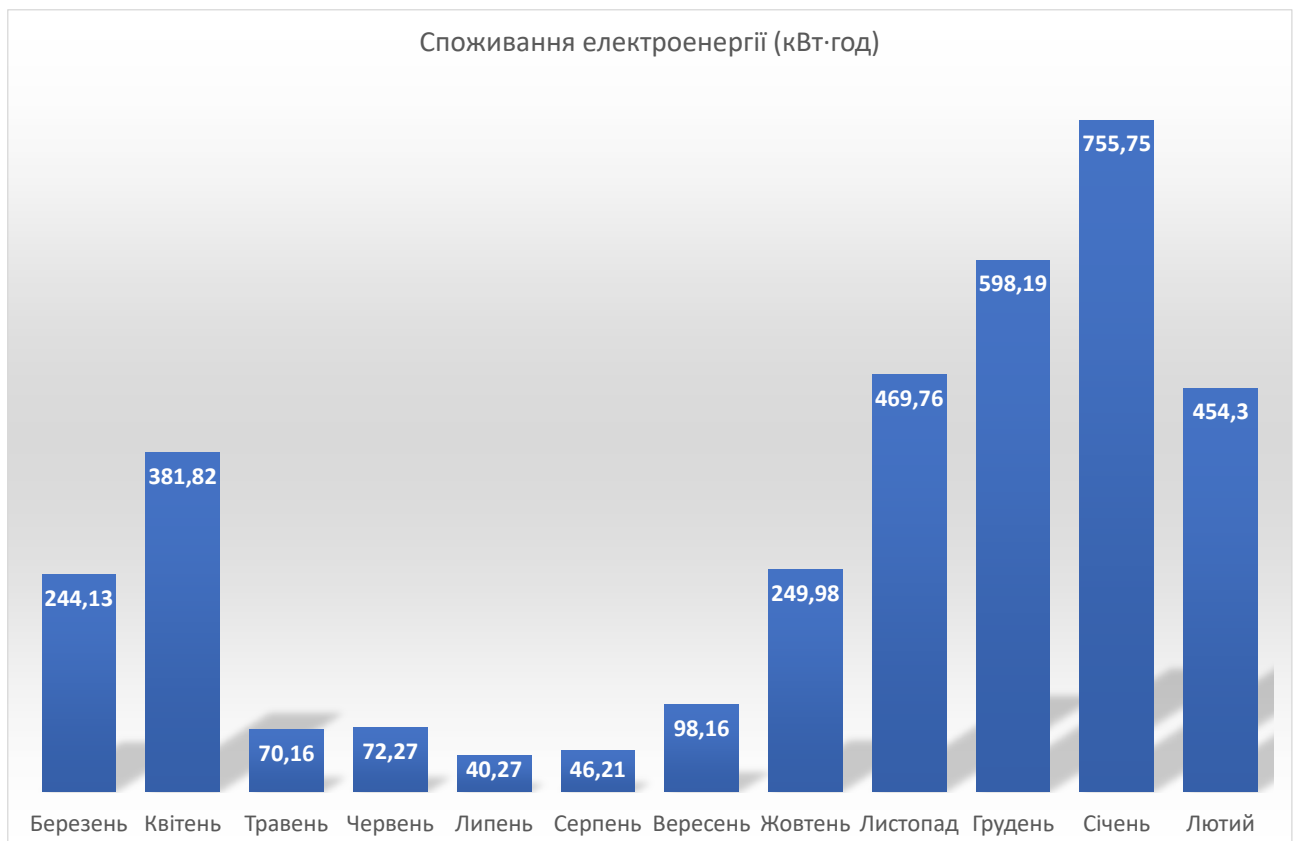


Рисунок 2.8 - Щомісячне споживання електроенергії тепловим насосом за місяцями на основі операційних даних з платформи myUplink

2.12 Сезонні тенденції у щомісячному споживанні електроенергії

Щоб краще зрозуміти сезонні потреби домогосподарства в опаленні та гарячій воді, було зібрано щомісячні дані та проаналізовано їх за допомогою Excel. Набір даних містив значення споживання енергії на опалення та гарячу воду тепловим насосом, середню температуру на вулиці та спожиту електроенергію, як показано в таблиці 2.1. Кількість електроенергії, спожитої

тепловим насосом, значно змінювалася залежно від пори року. Найвищий попит на енергію спостерігався взимку, особливо в січні, коли тепловий насос спожив 1881,3 кВт·год енергії, як показано в таблиці 2.1. Це було пов'язано переважно з низькими температурами повітря на вулиці, що змушувало тепловий насос працювати інтенсивніше.

Таблиця 2.1 - Щомісячні показники опалення, гарячого водопостачання, температури повітря на вулиці та споживання електроенергії за даними теплового насоса (2024–2025)

Місяці	Опалення (кВт·год)	Гаряча вода (кВт·год)	Середня температура повітря [°C]	Споживання електроенергії (кВт·год)
Березень	697,1	84,1	9	244,13
Квітень	1100,7	159,3	10	381,82
Травень	189,6	161,2	20	70,16
Червень	162,4	155,6	20	72,27
Липень	61,8	159,7	21	40,27
Серпень	65,6	179,3	21	46,21
Вересень	416,7	152,6	19	98,16
Жовтень	937,3	162,6	17	249,98
Листопад	1402	148,2	10	469,76
Грудень	1675,1	179,3	5	598,19
Січень	1881,3	234,8	5	755,75
Лютий	1220,2	142,7	4	454,30

Влітку потреба в опаленні була мінімальною; наприклад, у липні знадобилося лише 61,8 кВт·год. Що пов'язане з необхідністю прогрівати теплу підлогу встеленою плиткою.

За весь рік система спожила загалом 3 480,99 кВт·год електроенергії. Цей детальний розподіл допоміг виявити сезонні закономірності у споживанні енергії та попиті на електроенергію, що стало корисним вхідним даними для моделювання та оптимізації автономної системи «сонячна батарея-акумулятор-

тепловий насос». Це також забезпечило врахування в розмірах системи як пікових, так і мінімальних сценаріїв навантаження протягом року.

2.13 Висновки до розділу

1. Встановлено, що потреба в опаленні приміщень має виражений сезонний характер і лінійно зростає зі зниженням температури зовнішнього повітря, тоді як потреба в гарячій воді залишається відносно стабільною протягом року.

2. Встановлено, що залежність COP теплового насосу від температури зовнішнього повітря є оберненою: зі зниженням температури повітря коефіцієнт корисної дії зменшується через збільшення роботи компресора для забезпечення необхідної теплової потужності. Теоретичною межею ефективності є цикл Карно, проте реальні системи мають нижчі показники COP через неминучі термодинамічні втрати в компонентах системи.

3. Встановлено, що високоширотні регіони, до яких належить північна частина України, характеризуються вираженою сезонною асиметрією сонячної інсоляції: максимальне надходження сонячної енергії припадає на літній період, тоді як у зимові місяці інсоляція мінімальна. Це створює дисбаланс між виробництвом фотоелектричної енергії та потребою в ній для роботи теплового насоса, який досягає максимуму саме взимку.

4. Для практичного дослідження обрано реальний об'єкт — односімейний житловий будинок площею 85 м² у місті Чернігові, обладнаний тепловим насосом NIBE F2050-6 номінальною потужністю 6 кВт. Кліматичні умови регіону створюють суттєве навантаження на систему опалення і водночас обмежують можливості фотоелектричної генерації взимку.

5. За результатами річного моніторингу, проведеного за допомогою платформи NIBE myUplink, встановлено, що загальне річне споживання електроенергії тепловим насосом становить 3480,99 кВт·год. Максимальне місячне споживання спостерігалось в січні — 755,75 кВт·год. Пік споживання

енергії припадає на період з листопада по лютий, коли сумарне енергоспоживання становить понад 60 % річного показника.

6. Отримані експериментальні дані щодо сезонних коливань електроспоживання тепловим насосом та кліматичні характеристики регіону Чернігова створюють необхідну інформаційну базу для подальшого математичного моделювання та розрахунку оптимальної конфігурації автономної системи «фотоелектрична станція – акумулятор – тепловий насос», включаючи визначення необхідної потужності фотоелектричних панелей та ємності акумуляторної батареї.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Методика проведення розрахунків

Теоретична основа, описана в розділі 2, застосовується в MATLAB для моделювання роботи комбінованої системи «Сонячна батарея-акумулятор-тепловий насос» протягом 5-річного періоду з кроком у 1 годину. Процес здійснюється поетапно: спочатку визначається потреба в опаленні, потім моделюються основні компоненти, і нарешті аналізується загальний енергетичний баланс.

3.1.1 Моделювання потреби в опаленні

Платформа myUplink реєструє окремі сумарні значення для компресорів опалення та гарячого водопостачання. У цьому проекті ці дані розглядаються як загальна теплова енергія, що подається до системи опалення приміщень (SH) та системи гарячого водопостачання (DHW). У моделі MATLAB вони представляють теплову потужність теплового насоса, а відповідну електричну потужність розраховують шляхом ділення теплової енергії на коефіцієнт корисної дії (Coefficient of Performance) (COP) для кожного режиму роботи. Залежність між потребою в опаленні приміщень та зовнішньою температурою підбирається за допомогою методу нелінійних найменших квадратів, реалізованого в наборі інструментів MATLAB для підбору кривих. Дані описуються кусково-лінійною моделлю, де потреба в опаленні лінійно зменшується з підвищенням температури нижче точки рівноваги та дорівнює нулю вище неї.

$$\dot{Q}_{SH}(T_{out}) = \begin{cases} ab - aT_{out}, & T_{out} < t_h \\ 0, & T_{out} \geq t_h \end{cases} \quad (3.1)$$

де a - представляє коефіцієнт тепловтрат;

t_h - температуру рівноваги.

Той самий підхід застосовується до потреби в гарячій воді для побутових

потреб із додаванням постійного члена, щоб відобразити її майже рівномірне базове навантаження. Крім того, потреба в гарячій воді для побутових потреб менш залежить від зовнішньої температури, частково через низькочастотний характер взаємозв'язку між температурою повітря та температурою на глибині в землі, де прокладені водопровідні труби, а також вона дуже залежить від мешканців будинку.

$$\dot{Q}_{DHW}(T_{out}) = \begin{cases} \alpha b + c - \alpha T_{out}, & \left\{ \begin{array}{l} T_{out} < t_b \\ T_{out} \geq t_b \end{array} \right. \end{cases} \quad (3.2)$$

де α - позначає нахил (Вт/°С);

t_b - температуру точки перелому (°С);

c - константу (кВт).

Отримані параметри наведені в розділі 3.2, вони використовуються для моделювання.

3.1.2 Ефективність теплового насоса

Ефективність теплового насоса описується за допомогою коефіцієнта COP. На основі експлуатаційних даних значення COP були підібрані в MATLAB за допомогою регресійної кривої такого вигляду:

$$COP(T_{out}) = \frac{A}{T_{out} - B} \quad (3.3)$$

де T - температура зовнішнього повітря;

A і B - параметри апроксимації,

A - представляє константу масштабування;

B - температурний коефіцієнт (°С).

Ця апроксимована функція потім використовується разом із функціями попиту на опалення (SH) та гаряче водопостачання (DHW) для розрахунку погодинного попиту на електроенергію теплового насоса протягом року. Функція підгонки обрана такою, щоб мати той самий вигляд, що й ККД циклу

Карно, виходячи з припущення, що реальні характеристики теплового насоса матимуть ту саму форму, що й теоретична верхня межа.

3.1.3 Виробництво фотоелектричної енергії

Виробництво фотоелектричної енергії розраховується на основі вимірної сонячної інтенсивності в Чернігові за допомогою рівнянь, наведених у розділі 2. Вихідна потужність залежить від площі панелей, їхньої ефективності та рівня сонячної радіації. Виробництво фотоелектричної енергії розраховується на основі даних про вимірну сонячну інтенсивність для Чернігова, отриманих від SVEBY (Standardise and Verify Energy Performance in Buildings).

Розрахунки виконуються за рівняннями, описаними в розділі 2, при цьому вихідна потужність залежить від площі панелей, їхньої ефективності та рівня сонячного випромінювання. Годинні профілі фотоелектричної генерації створюються в MATLAB і коригуються для різних розмірів систем у діапазоні від 5 до 20 кВт, щоб оцінити, як продуктивність змінюється залежно від потужності. Це відповідає приблизній площі панелей від 25 до 100 м² при ефективності близько 20%. Для типового односімейного будинку площею 85 м² з площею даху приблизно від 100 до 120 м² найбільша система покриває майже весь дах. Менші системи добре розміщуються на одному схилі. Додаткові панелі також можна встановити на гаражі або інших сусідніх спорудах, щоб розширити доступну площу для монтажу. Модель не враховує жодних обмежень виробництва, пов'язаних з інвертором або іншими електронними обмеженнями регулювання потужності, тобто потенційна генерація не обмежувалася апаратним забезпеченням системи.

3.1.4 Динаміка акумуляторного зберігання

Моделювання працює з годинним кроком часу. Акумулятор моделюється як моделювання його SOC з кроком часу. Кожну годину розраховується баланс

між виробництвом фотоелектричної енергії та попитом на електроенергію в будівлі. Якщо є надлишок електроенергії, акумулятор заряджається, але лише до своєї максимальної ємності та з урахуванням втрат ефективності при циклі заряджання-розряджання. Якщо попит перевищує пропозицію фотоелектричної енергії, акумулятор розряджається, щоб покрити різницю. Здійснюється таке покрокове оновлення рівня заряду (SOC). Для оцінки загальної ефективності системи накопичення енергії в моделюванні враховується двостороння ефективність на рівні 92%, що відображає втрати енергії під час циклів заряджання та розряджання. Результати цього моделювання, представлені далі в розділі 3.6, описують, як ємність акумулятора впливає на його річну поведінку та загальний коефіцієнт самозабезпечення (SSR).

3.1.5 Енергетичний баланс та самодостатність

Нарешті, ефективність системи оцінюється за допомогою коефіцієнта самодостатності, як зазначено в розділі 2. На кожному часовому кроці чиста енергія (виробництво фотоелектричної енергії мінус споживання домогосподарства) коригує стан заряду акумулятора, і збирається енергія, фактично поставлена домогосподарству. Цей коефіцієнт обчислюється для різних комбінацій потужностей фотоелектричних систем (5–20 кВт) та ємностей акумуляторів (50, 100, 150 кВт·год), а результати усереднюються за п'ятирічним набором даних для отримання загальної оцінки. Також відстежується SSR за роками, щоб зафіксувати зміни між роками, що пояснюється в розділі результатів. Завдяки систематичному аналізу цих сценаріїв підхід показує, як зміни розміру фотоелектричної системи та ємності акумулятора впливають на енергетичну самодостатність домогосподарства та незалежність від енергомережі

3.2 Результати розрахунків

3.2.1 Вплив зовнішньої температури на потребу в теплі

Далі наведено та проаналізовано основні висновки, отримані в результаті аналізу ефективності автономної системи теплового насоса, що працює на сонячній енергії. Система була протестована з використанням даних за повний рік, зібраних у реальному режимі в односімейному будинку в місті Чернігів. Мета полягала в тому, щоб зрозуміти, як система працює в різні пори року, та оцінити, чи можуть сонячна енергія та акумуляторні батареї задовольняти потреби будинку в опаленні протягом усього року.

На основі інтерпольованих даних та згладжених даних із використанням 48-годинного вікна усереднення на рисунку 3.1 показано, як попит на тепло змінюється залежно від зовнішньої температури. Діаграма розсіювання чітко показує, що існує сильна негативна кореляція: із підвищенням температури потреба в опаленні знижується, доки не досягне точки рівноваги, де опалення приміщень більше не потрібне. Це логічно, оскільки тепла погода природно зменшує потребу в опаленні.

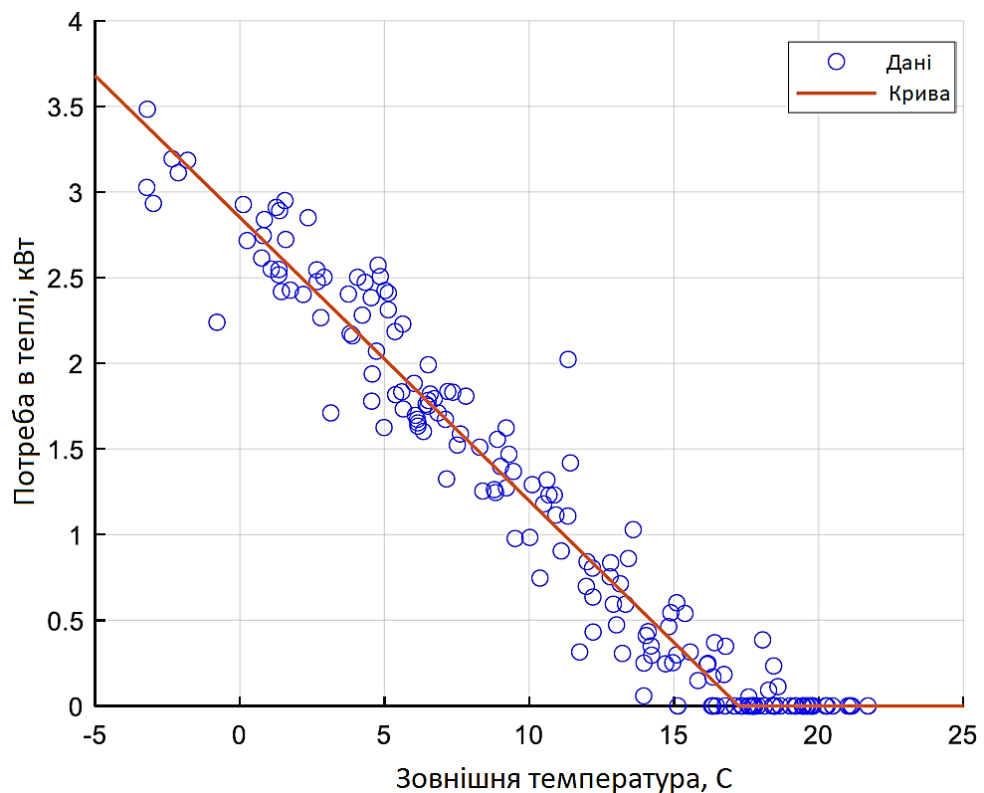


Рисунок 3.1 - Взаємозв'язок між потребою в теплі та температурою

повітря зовні в осінні місяці

На графіку сині кола позначають точки даних, а червона лінія показує регресійну модель, яка точно слідує загальній тенденції, що вказує на хорошу відповідність і переважно лінійну залежність. Регресійна модель показує коефіцієнт теплових втрат $a = 165 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$ та температуру рівноваги $b = 17,2 \text{ }^\circ\text{C}$, що вказує на те, що попит на опалення стабільно зменшується із підвищенням температури повітря зовні та стає незначним вище цієї точки. При температурі повітря зовні нижче $5 \text{ }^\circ\text{C}$ попит на опалення приміщень досягає найвищого спостережуваного значення — близько $3,5 \text{ кВт}$. Хоча дані для більш холодних умов відсутні, як теорія, так і поведінка системи вказують на те, що потреба в опаленні продовжує зростати при зниженні температури, як показано на рисунку 3.7. Тепловий насос NIBE F2050-6 з максимальною потужністю опалення близько 6 кВт , зазначеною в розділі 2, обмежує продуктивність системи при дуже низьких температурах зовнішнього повітря. Збіг даних навколо лінії апроксимації ще більше підтверджує надійність апроксимації та доцільність використання моделі лінійної регресії. Це узгоджується з теорією та підтверджує, що температура повітря зовні є головним фактором, що впливає на потреби в опаленні.

3.2.2 Вплив температури повітря зовні на гарячу воду

На рисунку 3.2 показано, як температура зовнішнього повітря впливає на попит на гарячу воду. Щоб зменшити короткострокові коливання та забезпечити узгодженість часових рядів, дані щодо гарячої води для побутових потреб (ГВП) згладжуються з інтервалом у 48 годин перед проведенням регресійного аналізу. Цей метод усереднення показує загальні тенденції в системі. Однак він не враховує фактичні зміни у споживанні гарячої води для побутових потреб, спричинені щоденними та щотижневими звичками, такими як прийняття душу та приготування їжі.

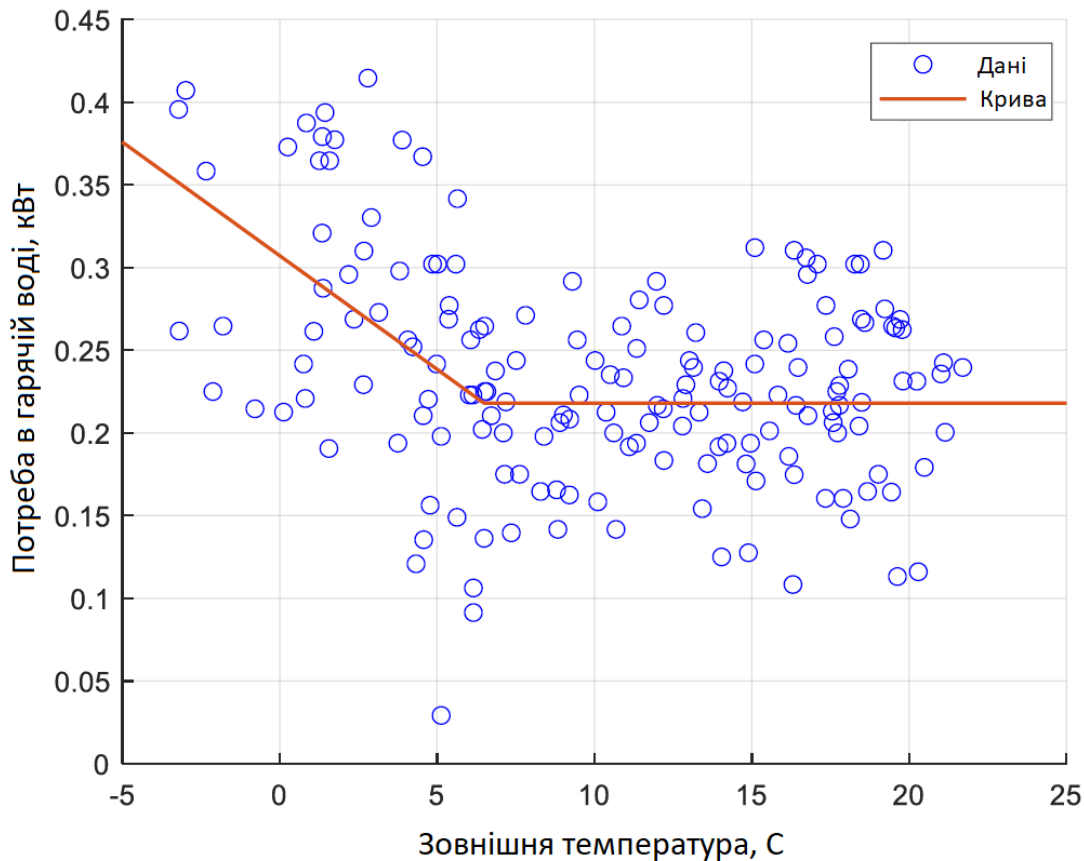


Рисунок 3.2 - Взаємозв'язок між попитом на гарячу воду та температурою зовнішнього повітря в осінні місяці

Кожне синє коло представляє фактичні дані, що були записані, тоді як червона лінія показує загальну тенденцію. Апроксимована крива показує залежний від температури нахил $a = 13,7 \text{ Вт}/^\circ\text{С}$, температуру точки перелому $t_b = 6,5 \text{ }^\circ\text{С}$ та базове навантаження $C = 0,22 \text{ кВт}$, що вказує на те, що попит на гарячу воду залишається досить постійним, з лише незначним зростанням під час холодніших періодів. З діаграми видно, що коли погода холодніша, особливо при температурі близько $0 \text{ }^\circ\text{С}$ або нижче, люди, як правило, використовують більше гарячої води, і попит досягає відносно високих рівнів. У міру того, як температура на вулиці стає теплішою, потреба в гарячій воді поступово зменшується, а потім стабілізується. Як тільки температура повітря на вулиці піднімається вище приблизно $10 \text{ }^\circ\text{С}$, попит на гарячу воду, здається, залишається постійним. Червона лінія тренду робить цю закономірність більш чіткою, хоча точки даних більш розкидані, що вказує на те, що взаємозв'язок

між температурою на вулиці та попитом на гарячу воду менш помітний.

3.2.3 Сезонна закономірність сонячної енергії

На рисунку 3.3 показано коливання виробництва сонячної фотоелектричної енергії для системи потужністю 8 кВт (що еквівалентно площі фотоелектричних панелей 40 м², з використанням панелей потужністю 420 Вт та ККД 21%) за п'ятирічний період.

Жирна синя лінія відображає середнє значення щотижневої щоденної генерації, тоді як затінена область показує діапазон між найнижчими та найвищими щоденними значеннями, зафіксованими протягом кожного тижня.

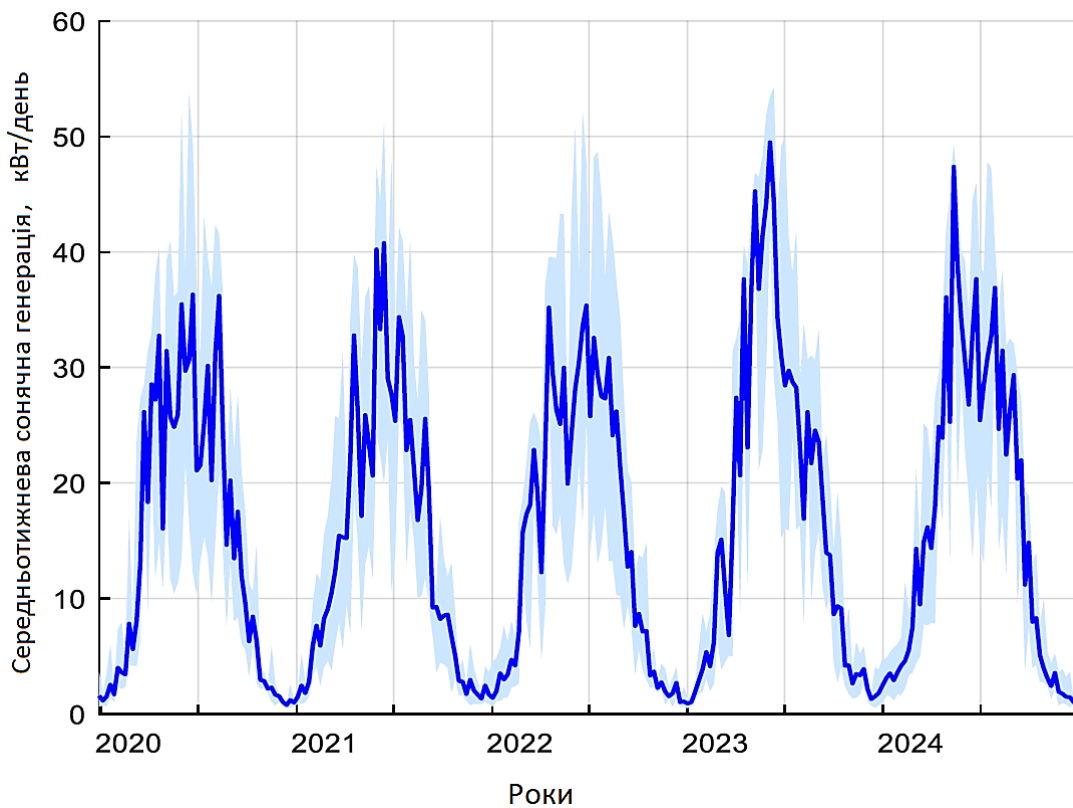


Рисунок 3.3 - Середньотижнева сонячна генерація електроенергії за 5 років

Генерація сонячної енергії різко зростає навесні, посилюється протягом літніх місяців, а потім починає знижуватися з настанням осені, досягаючи дуже низьких рівнів взимку. Ця сезонна тенденція повторюється щороку, створюючи

чітку та передбачувану закономірність. Затінена смуга показує, що хоча тижневе виробництво іноді коливається, загальна тенденція залишається стабільною.

3.2.4 Продуктивність теплового насоса та температура повітря зовні

На рисунку 3.4 показано, як продуктивність теплового насоса, виміряна за допомогою коефіцієнта COP, змінюється залежно від температури повітря зовні. Коефіцієнт COP обчислюється як щомісячна кількість теплової енергії, поділена на споживання електроенергії за той самий місяць. З підвищенням температури повітря зовні коефіцієнт COP зростає.

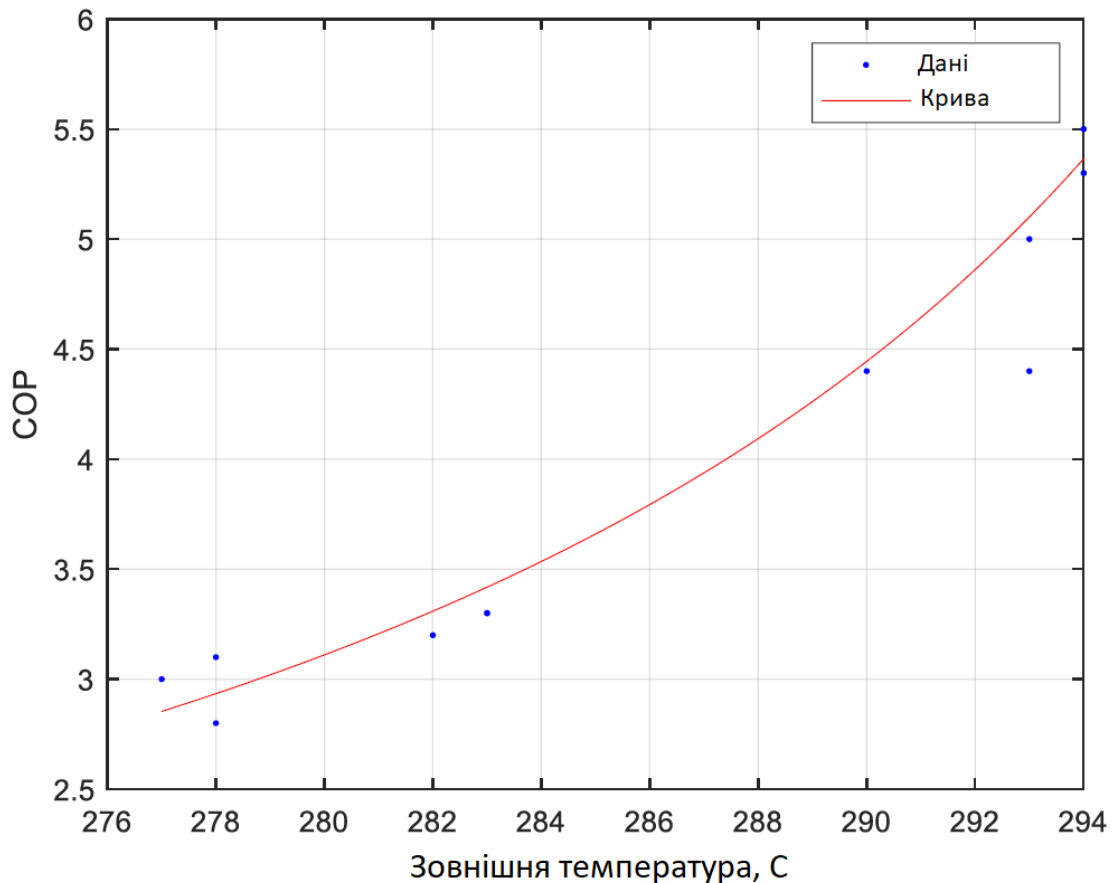


Рисунок 3.4 - Коефіцієнт корисної дії (COP) у порівнянні з температурою зовнішнього повітря

На рисунку сині точки — це розрахункові дані з таблиці 2.1, а червона крива — це математична функція, підібрана за рівнянням 3.2, яка добре

відповідає даним. При нижчих температурах (близько 3–7 °С) коефіцієнт COP низький (близько 2,8–3,2), що означає меншу ефективність системи. При вищих температурах (близько 294 К або 21 °С) COP перевищує 5, що свідчить про кращу ефективність. Крива, що відповідає COP, показує, як ефективність системи коливається залежно від температури повітря зовні. Параметри моделі: $A = 103,6$ та $B = 313,3$ К (~40 °С). Тепловий насос працює ефективніше в помірних умовах і менш ефективно в холодні періоди.

Ця крива є корисною, оскільки дозволяє оцінити значення COP лише за температурою зовнішнього повітря, що допомагає у подальших розрахунках, таких як прогнозування споживання електроенергії та моделювання енергетичних систем. Це означає, що для виробництва тієї ж кількості тепла у холодні періоди потрібно було більше електроенергії.

Ці підібрані параметри використовуються в моделюванні для розрахунку опалення приміщень, ГПВ та оцінки ефективності теплового насоса залежно від змінних температур зовнішнього повітря.

3.2.5 Сезонні коливання попиту на електроенергію

На рисунку 3.5 показано змодельовані тижневі коливання попиту на електроенергію в період з березня 2024 року по березень 2025 року. Темно-синя лінія відображає середній попит, тоді як світліша зафарбована область показує найвищі та найнижчі рівні кожного тижня. На початку року споживання електроенергії є дещо нестабільним, але загалом залишається помірним, часто в середньому нижче 1 кВт. З наближенням літа попит зменшується і досягає найнижчої точки приблизно в червні-серпні. Однак, починаючи з вересня, споживання електроенергії повільно починає зростати. Зростання стає більш помітним у листопаді, і протягом зимових місяців попит продовжує зростати, з'являються різкі піки.

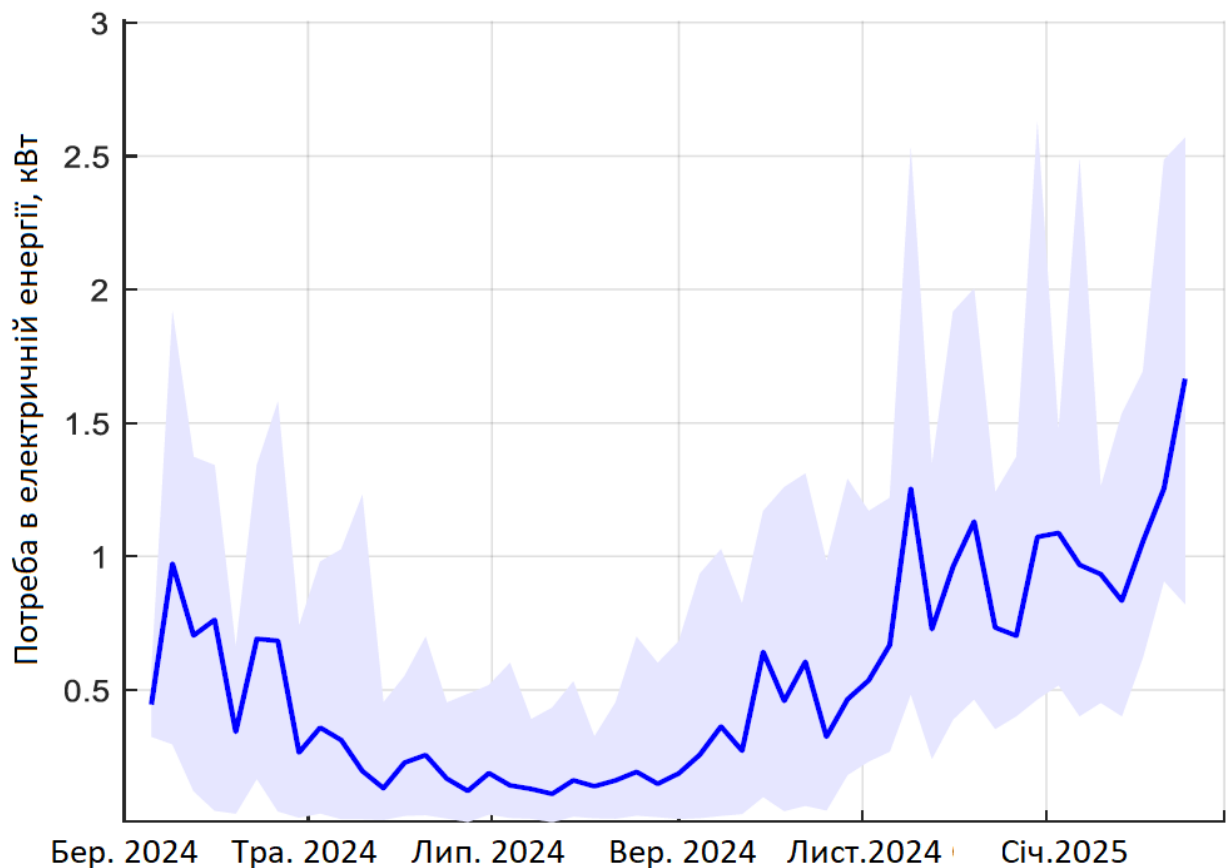


Рисунок 3.5 - Орієнтовний попит на електроенергію тепловим насосом (2024–2025)

На початку 2025 року попит на електроенергію досягає найвищого рівня. Ця тенденція відображає цілком природний перебіг: менший попит у теплі місяці та більший у холодну пору року, коли опалення та інші потреби сприяють зростанню енергоспоживання.

Модельована динаміка тісно збігається з вимірними даними, що свідчить про те, що модель точно відтворює поведінку системи в реальних умовах.

3.2.6 Динаміка заряду акумуляторної батареї протягом 5 років

На рисунку 3.6 показано стан заряду трьох акумуляторів різної ємності — 50 кВт·год, 100 кВт·год і 150 кВт·год — протягом п'яти років (2020–2025) для фотоелектричної системи потужністю 8 кВт. Динаміка SOC показує, що всі три типи акумуляторів проходять повторювані цикли заряджання та розряджання, що відображає сезонні коливання у виробництві сонячної енергії та споживанні

енергії.

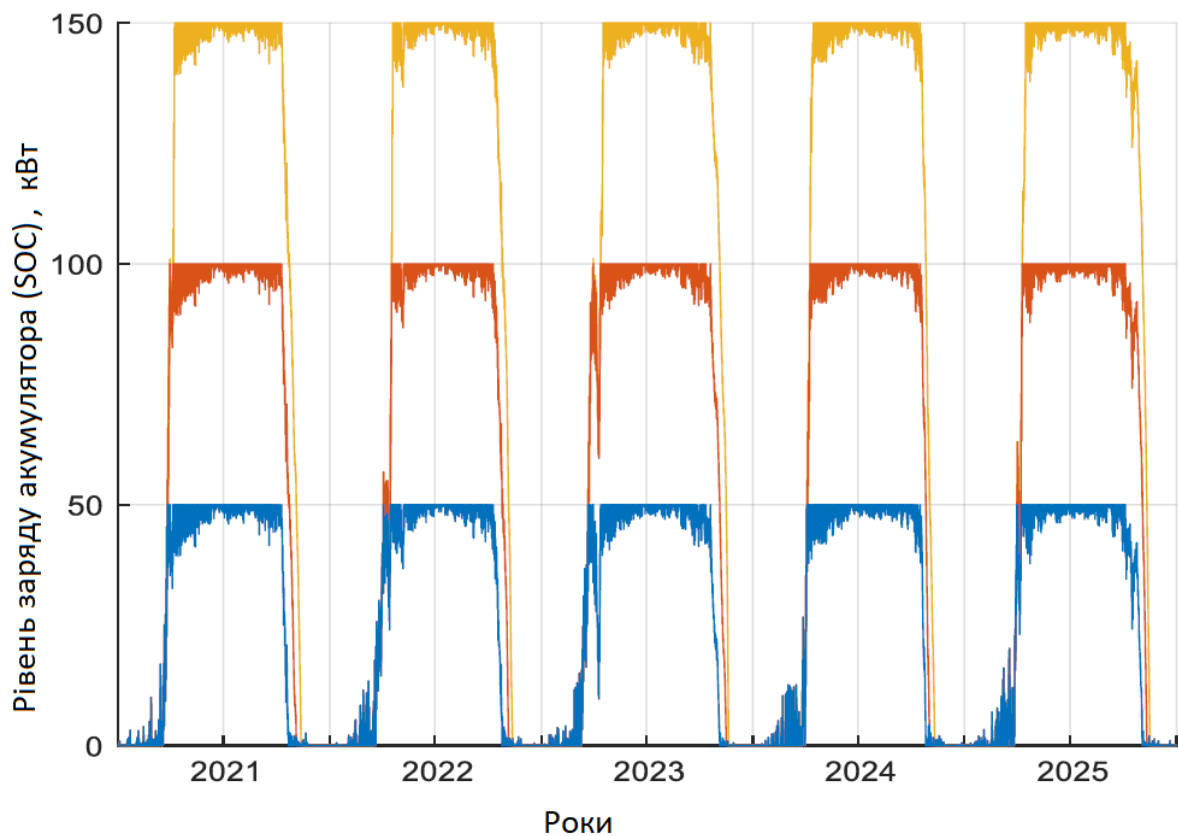


Рисунок 3.6 - Рівень заряду акумулятора протягом 5 років

Акумулятор ємністю 50 кВт·год швидко заряджається, але й так само швидко розряджається, що свідчить про його обмежену ємність. Акумулятор ємністю 100 кВт·год працює довше і забезпечує стабільніше постачання, тоді як акумулятор ємністю 150 кВт·год демонструє кращі показники, але все одно не може накопичити достатньо енергії, щоб вистачило від ранньої осені до весни. Це показує, що для розміру фотоелектричної батареї, яка використовується тут, акумулятор повинен бути набагато більшим, щоб покрити тривалий зимовий проміжок, або сама фотоелектрична батарея повинна бути більшою, щоб навіть невелика кількість зимового сонячного світла могла задовольнити попит. Однак жоден з цих варіантів, ймовірно, не буде економічно вигідним.

3.2.7 Коефіцієнт самозабезпечення в залежності від розміру фотоелектричної системи та ємності акумулятора

На рисунку 3.7 показано, як самозабезпеченість покращується при збільшенні розміру фотоелектричної системи з 5 кВт до 20 кВт для акумуляторів ємністю 50 кВт·год, 100 кВт·год та 150 кВт·год. Для моделювання використовується аналіз, заснований на 5-річних погодинних кліматичних даних SMHI (2020–2024).

Чим більші фотоелектрична система та акумулятор, тим вищий коефіцієнт самозабезпечення. Акумулятор на 150 кВт·год завжди демонструє найкращі результати, за ним йдуть акумулятори на 100 кВт·год, а потім на 50 кВт·год. Це означає, що більші фотоелектричні системи та більші акумулятори разом роблять будинок більш незалежним від зовнішнього електропостачання.

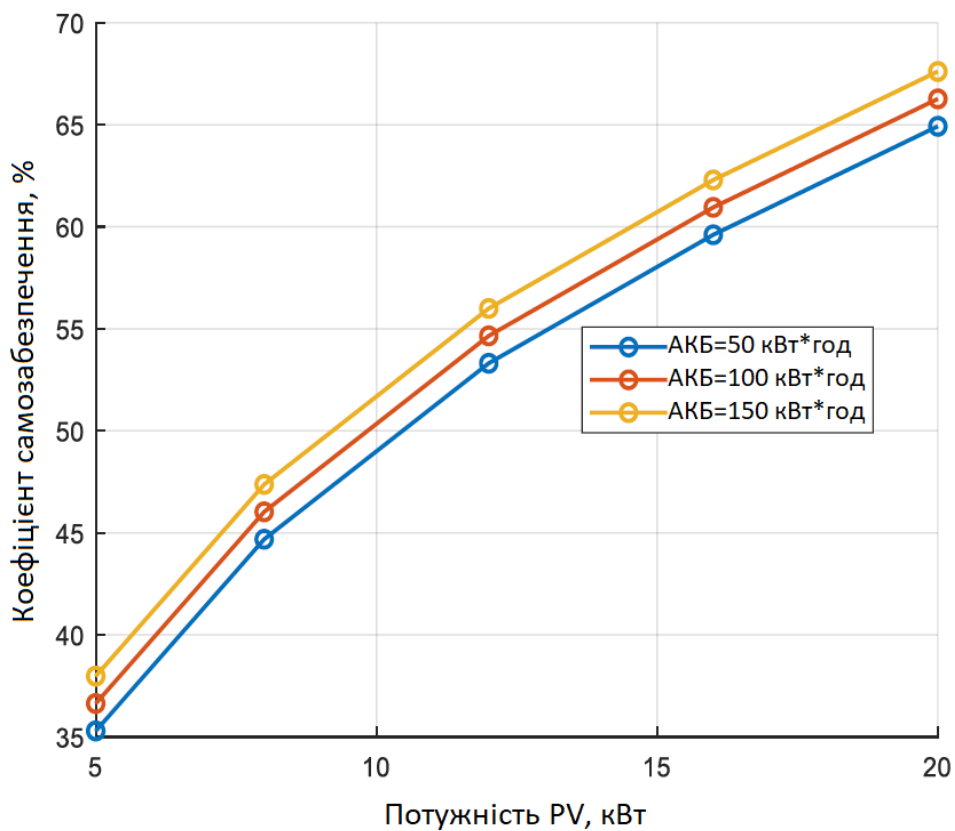


Рисунок 3.7 - Коефіцієнт самозабезпечення в залежності від розміру фотоелектричної системи та ємності акумулятора

3.2.8 Річний коефіцієнт самозабезпечення для різних конфігурацій фотоелектричних систем та акумуляторів

На рисунку 3.8 показано, як змінюється коефіцієнт самозабезпечення з 2020 по 2024 рік для різних конфігурацій фотоелектричних систем та акумуляторів. Системи з більшими фотоелектричними масивами стабільно досягають вищого рівня самозабезпечення, тоді як збільшення ємності акумулятора дає менший приріст. Це означає, що виробництво фотоелектричної енергії має сильніший вплив на автономність системи, ніж розмір акумуляторної батареї. Незначні щорічні коливання в основному відображають відмінності в сонячній радіації. Результати підтверджують тенденцію, що спостерігається на рисунку 3.9, показуючи, що збільшення потужності фотоелектричної системи загалом є ефективнішим, ніж розширення акумуляторної батареї, для підвищення автономності системи.

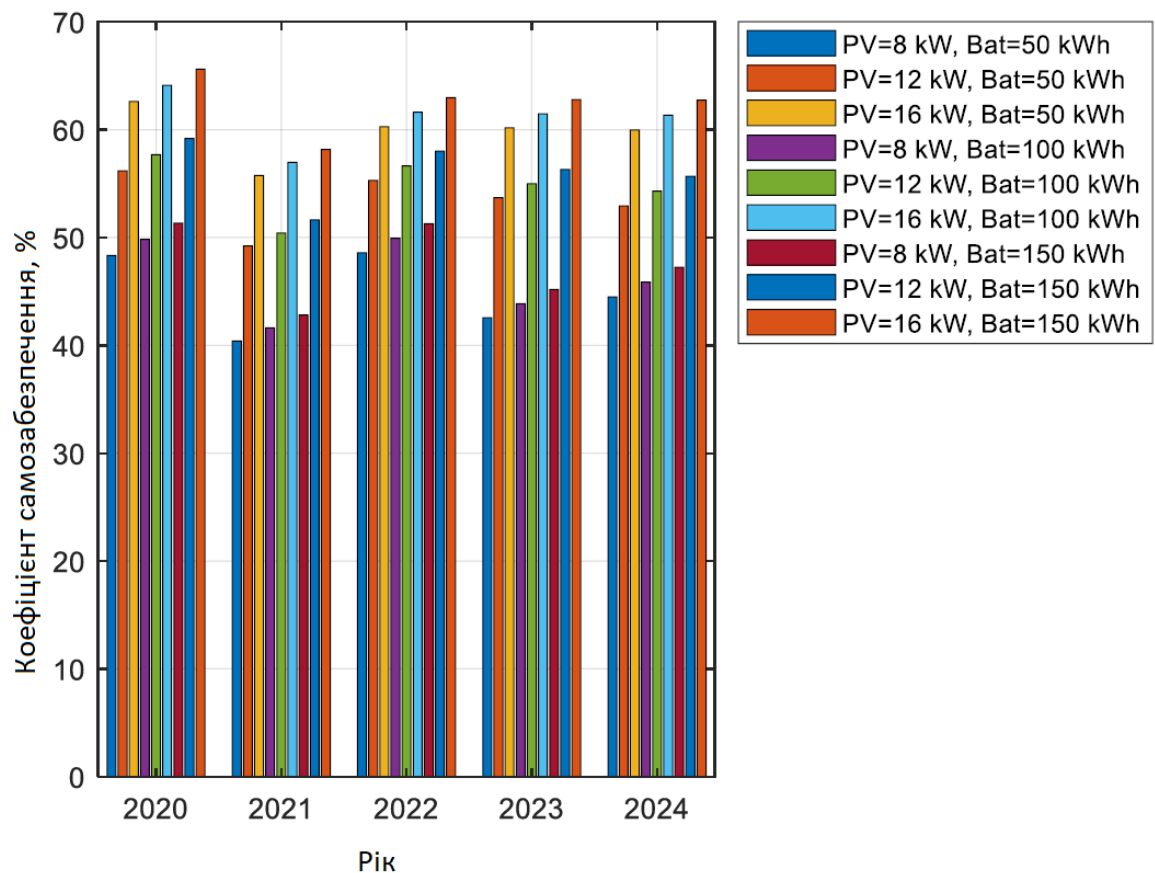


Рисунок 3.8 - Коефіцієнт самозабезпечення по роках

Хоча поточний аналіз враховує потужності фотоелектричних систем до 20 кВт, результати свідчать, що навіть більші масиви могли б ще більше підвищити самозабезпеченість, особливо в зимові місяці, коли доступність сонячної енергії є меншою.

3.2.9 Сезонні коливання рівня заряду акумулятора

Середньомісячний рівень заряду (SOC) для фотоелектричної системи потужністю 8 кВт з акумулятором на 100 кВт·год демонструє чітку сезонну закономірність. Акумулятор майже розряджається протягом темних зимових місяців, починає стабільно заряджатися навесні та залишається зарядженим від пізньої весни до ранньої осені.

На рисунку 3.9 чітко показано, як влітку доступна надлишкова сонячна енергія, тоді як зима залишається складною через низьку інсоляцію та високий попит на опалення.

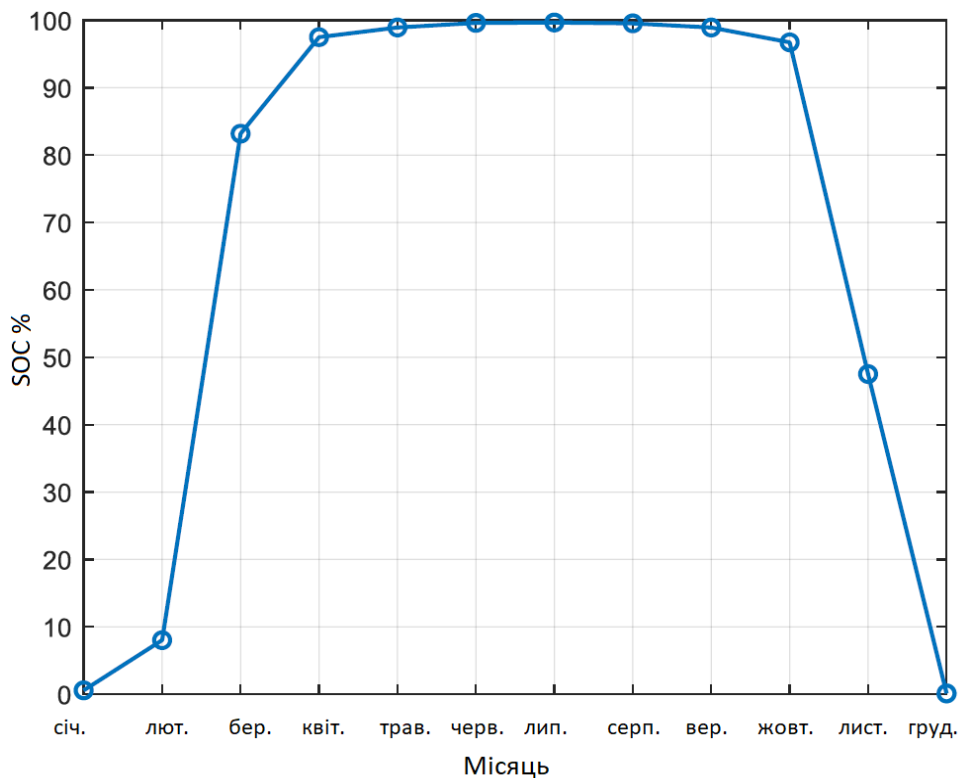


Рисунок 3.9 - Середньомісячний рівень заряду (SOC)

Цей показник розраховується на основі всіх годинних даних за кожен місяць, усереднених за весь період моделювання з січня по грудень. Він

підкреслює необхідність збалансувати потужність фотоелектричної системи, ємність акумуляторної батареї та попит домогосподарств у регіонах з високою широтою.

3.3 Аналіз отриманих результатів

Результати показують, що попит на опалення в північному кліматі сильно змінюється залежно від температури повітря. Коли погода холодна, попит різко зростає, а коли температура підвищується, попит падає майже до нуля. Ця закономірність відповідає типовій роботі систем опалення, коли з нагріванням зовнішнього середовища потрібно менше енергії.

Однак споживання гарячої води для побутових потреб залишається майже постійним протягом року, що створює стабільну базову лінію енергоспоживання. Ця закономірність відповідає повсякденному досвіду в холодних регіонах і показує, що хоча відновлювані джерела є життєво важливими для систем сталого енергопостачання, їхня доступність відрізняється залежно від пори року та типу

Тепловий насос демонструє, що його ефективність значною мірою залежить від температури зовнішнього повітря. У зимові місяці коефіцієнт корисної дії (COP) знижується, що означає, що насосу потрібно більше електроенергії для забезпечення того самого опалення. Це логічно, оскільки тепловому насосу легше забирати тепло з теплішого повітря, тому він працює ефективніше. Влітку COP перевищує 5, що робить систему набагато ефективнішою. Така поведінка підтверджує, що коливання COP є ключовим фактором для точного моделювання. Цей підхід до підбору кривої забезпечує як візуальне розуміння, так і практичний інструмент для моделювання реальної поведінки теплового насоса в різних кліматичних умовах. Якби вважалося, що ефективність залишається постійною, зимовий попит легко було б недооцінити. Доступність сонячної енергії слідує майже протилежному циклу попиту на опалення, де виробництво сонячної енергії зростає в тепліші місяці, тоді як

попит на опалення відповідно зменшується. Сонце надає максимальну енергію влітку, але дуже мало взимку. Ця сезонна невідповідність є однією з головних перешкод для повного відключення системи від мережі в північних регіонах. Моделювання акумуляторів дуже чітко показує цю проблему: накопичувач залишається повним протягом більшої частини літа, але стає майже порожнім у грудні та січні. Навіть маючи ємність 100 кВт·год, акумулятор не може покрити довгі темні періоди зими.

Аналіз також показує, що збільшення потужності фотоелектричних систем або використання більших акумуляторів підвищує коефіцієнт самозабезпечення, але лише до певної межі. Після цього вигоди стають незначними, оскільки основною проблемою є не щоденні коливання, а тривалий сезонний розрив. Це свідчить про те, що для досягнення повної незалежності потрібно не лише збільшення потужності, а й сезонне накопичення енергії, додаткові джерела енергії або певне обмежене підключення до мережі. Ось чому для звичайних будинків розумніше зосередитися на добре спроектованих фотоелектричних системах та акумуляторах, які ефективно працюють цілий рік, а не збільшувати розміри системи таким чином, що це все одно не зможе повністю вирішити зимову проблему. Система працює дуже добре навесні, влітку та восени, але її продуктивність обмежується сильними сезонними відмінностями. Ці висновки надають важливу основу для вдосконалення проектування подібних систем у холодному кліматі.

3.4 Висновки до розділу

1. Результати розрахунків підтверджують, що попит на опалення має виражену лінійну залежність від зовнішньої температури, тоді як попит на гарячу воду характеризується стабільним базовим навантаженням із незначною сезонною складовою.

2. Проведено апроксимацію залежності коефіцієнта корисної дії (COP) теплового насоса від температури зовнішнього повітря у формі, аналогічній циклу Карно. Встановлено, що в діапазоні температур 3–21 °C значення COP змінюється від 2,8 до понад 5, що свідчить про суттєве зниження ефективності теплового насоса в холодний період року та необхідність врахування цієї залежності при розрахунку електроспоживання.

3. Проведено моделювання роботи фотоелектричних систем потужністю 5–20 кВт (еквівалентно площі панелей 25–100 м² при ефективності ~20%) та акумуляторних батарей ємністю 50, 100 та 150 кВт·год. Результати демонструють, що коефіцієнт самозабезпечення (SSR) зростає як зі збільшенням потужності фотоелектричної системи, так і зі збільшенням ємності акумулятора, причому вплив потужності фотоелектричних панелей на автономність системи є більш значущим, ніж ємності акумулятора.

4. Моделювання динаміки стану заряду акумуляторів різної ємності протягом 5-річного періоду виявило виражену сезонну циклічність: акумулятори досягають повного заряду в літні місяці та майже повністю розряджаються в грудні–січні. Навіть акумулятор ємністю 150 кВт·год у поєднанні з фотоелектричною системою потужністю 8 кВт не забезпечує енергетичної автономії в зимовий період, що свідчить про принципову обмеженість системи без сезонного накопичення енергії або резервного джерела живлення.

5. Встановлено фундаментальну сезонну невідповідність між виробництвом сонячної енергії та попитом на електроенергію для теплового насоса в умовах високих широт: максимальна фотоелектрична генерація припадає на літній період, коли потреба в опаленні мінімальна, тоді як взимку, при піковому попиті на тепло, сонячна інсоляція є мінімальною. Ця невідповідність є ключовим фактором, що обмежує можливість досягнення повної енергетичної автономії системи.

6. Отримані результати свідчать, що для приватного будинку площею 85 м² в кліматичних умовах Чернігівщини повне відключення від

електромережі за рахунок лише фотоелектричної станції та акумуляторної батареї є недоцільним з економічної точки зору. Раціональним рішенням є гібридна схема з обмеженим використанням мережевого підключення в зимовий період або введення додаткового сезонного джерела накопичення енергії.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Причини електротравм, напруга кроку

Як і при інших видах травм, при електротравмах виділяють технічні, організаційно-технічні, організаційні і організаційно-соціальні їх причини [28].

До технічних причин належать: недосконалість конструкції електроустановки і засобів захисту, допущені недоліки при виготовленні, монтажі і ремонті електроустановки.

До основних організаційних причин електротравм належать:

- відсутність (не призначення наказом) на підприємстві особи, відповідальної за електрогосподарство або невідповідність кваліфікації цієї особи чинним вимогам;
- недостатня укомплектованість електротехнічної служби працівниками відповідної кваліфікації;
- відсутність на підприємстві посадових інструкцій для електротехнічного персоналу та інструкцій із безпечного обслуговування та експлуатації електроустановок;
- недостатня підготовленість персоналу з питань електробезпеки, несвоєчасна перевірка знань, невідповідність групи з електробезпеки персоналу характеру робіт, що виконуються;
- недотримання вимог щодо безпечного виконання робіт в електроустановках за нарядами-допусками, розпорядженнями та в порядку поточної експлуатації;
- неефективний нагляд, відомчий і громадський контроль за дотриманням вимог безпеки при виконанні робіт в електроустановках та їх експлуатації.

До основних організаційно-соціальних причин електротравм належать: змушене виконання не за спеціальністю електробезпечних робіт; негативне ставлення до виконуваної роботи, обумовлене соціальними чинниками; залучення працівників до понадурочних робіт; порушення виробничої

дисципліни; залучення до роботи осіб віком до 18 років.

При переміщенні людини в зоні розтікання струму в землі її ноги будуть торкатися ділянок землі з різними потенціалами, а на людину буде діяти напруга, яка визначається різницею цих потенціалів і відома під назвою *напруга кроку* - різниця потенціалів між двома точками на поверхні землі в зоні розтікання струму, які знаходяться на відстані кроку (0,8 м) одна від одної. З наближенням до місця замикання на землю величина напруги кроку буде зростати, і вона може досягти небезпечних для людини значень вже при напрузі електроустановок 0.4 кВ, а в сиру погоду та за зволоженого ґрунту і при меншій напрузі. Тому Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів при наявності замикання на землю забороняють наближатися до місця замикання ближче 8 м поза приміщенням і 4 м в приміщенні без застосування засобів захисту - діелектричні боти, галоші, суха дошка, сухе гумове взуття тощо.

У цілому, заходи захисту людини від дії напруги кроку зводяться до розірвання мережі струму через людину по петлі "нога-нога", або різкого збільшення опору в цій петлі за рахунок використання різних підручних засобів. За необхідності невідкладного входу в зону небезпечних напруг кроку для надання допомоги потерпілим і відсутності під рукою засобів захисту, доцільно переміщуватися в цій зоні обережно, пересуваючи ступні по землі так, щоб вони постійно торкались одна другої.

4.2 Блискавкозахист

Блискавкозахист — це система захисних пристроїв та заходів, що призначені для забезпечення безпеки людей, збереження будівель та споруд, устаткування та матеріалів від можливих вибухів, займань та руйнувань, спричинених блискавкою.

Блискавка — особливий вид проходження електричного струму через величезні повітряні прошарки, джерелом якого є атмосферний заряд,

накопичений грозовою хмарою. Умови утворення таких хмар — велика вологість та швидка зміна температури повітря. За таких умов у атмосфері Землі проходять складні фізичні процеси, які призводять до утворення та накопичення електричних зарядів. При підвищенні напруженості електричного поля до критичних значень виникає розряд, який супроводжується яскравим свіченням (блискавкою) та звуком (громом). Довжина каналу блискавки може досягати кількох кілометрів, сила струму — 200 000 А, напруга— 150 000 кВ, а температура — 10000 °С і більше. Час існування блискавки 0,1 — 1 с. Щосекунди земну кулю уражають в середньому більше 100 блискавок [28].

Розрізняють первинні (прямий удар) і вторинні прояви блискавки.

Прямий удар блискавки (ураження блискавкою) — безпосередній контакт каналу блискавки з будівлею чи спорудою, що супроводжується протіканням через неї струму блискавки. Прямий удар блискавки здійснює на уражений об'єкт наступні дії: електричну, що пов'язана з ураженням людей і тварин електричним струмом та виникненням перенапруг на елементах, по яких струм відводиться в землю; теплову, що зумовлена значним виділенням теплоти на шляхах проходження струму блискавки через об'єкт; механічну, що спричинена ударною хвилею, яка поширюється від каналу блискавки, а також електродинамічними силами, що виникають у конструкціях, через які проходить струм блискавки.

Під вторинними проявами блискавки розуміють явища під час близьких розрядів блискавки, що супроводжуються появою потенціалів на конструкціях, трубопроводах, електропроводах всередині будівель і споруд, які не зазнали прямого удару блискавки. Вони виникають внаслідок електростатичної та електромагнітної індукції.

Електростатична індукція проявляється у наведені потенціалів на металевих елементах конструкції, в незамкнених металевих контурах, що може викликати іскріння всередині будівель та споруд і тим самим ініціювати пожежу чи вибух.

Електромагнітна індукція супроводжується появою в просторі змінного магнітного поля, яке індукує в металевих контурах, що утворені із різних протяжних комунікацій (трубопроводів, електропроводів і т. п.) електрорушійну силу (ЕРС).

У замкнутих контурах ЕРС призводить до появи наведених струмів. У контурах, в яких контакти недостатньо надійні в місцях з'єднання, такі струми можуть викликати іскріння або сильне нагрівання, що дуже небезпечно для приміщень, де утворюються вибухо- та (або) пожежонебезпечні концентрації.

Ще однією особливістю вторинного прояву блискавки є занесення високих потенціалів у будівлю по металоконструкціях, які підведені в цю будівлю (трубопроводах, рейкових шляхах, естакадах, проводах ліній електропередач і т. п.). Такі занесення супроводжуються електричними розрядами, які можуть стати джерелом вибуху чи пожежі.

Захист об'єктів від прямих ударів блискавки забезпечується шляхом встановлення блискавковідводів. Захист від електростатичної індукції (вторинний прояв блискавки) здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металоконструкціями в місцях їхнього зближення менше ніж на 10 см.. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металоконструкцій перед їх введенням у будівлю.

При виборі пристроїв блискавкозахисту за категоріями враховують важливість об'єкта, його висоту, місце розташування серед сусідніх об'єктів, рельєф місцевості, інтенсивність грозової діяльності. Останній параметр характеризується середньорічною тривалістю гроз у годинах для даної місцевості [28].

Таблиця 4.1 - Середня інтенсивність грозової діяльності у різних регіонах (областях) України

№ зп.	Регіони (області) України	Інтенсивність грозової діяльності, год/рік
1	Автономна Республіка Крим	40—60
2	Закарпатська, Запорізька, Донецька	80—100
3	Інші області України	60—80

Для захисту об'єкта від прямих ударів блискавки застосовують блискавковідвід — пристрій, який височіє над захищуваним об'єктом, сприймає удар блискавки та відводить її струм у землю. Захисна дія блискавковідводу базується на властивості блискавки уражати найбільш високі та добре заземлені металеві конструкції. За конструктивним виконанням блискавковідводи поділяються на стержневі, тросові та сітчасті, а за кількістю та загальною площею захисту — на одинарні, подвійні та багатократні. Окрім того, розрізняють блискавковідводи встановлені окремо та такі, що розташовані на захищуваному об'єкті. Будь-який блискавковідвід складається з блискавкоприймача (металевий стержень, трос, сітка), який безпосередньо сприймає удар блискавки; несівної опори (спеціальні стовпи, елементи конструкцій будівлі), на якій розташовується блискавкоприймач; струмовідводу (металевий провідник, конструкція), по якому струм блискавки передається в землю; заземлювача, який забезпечує розтікання струму блискавки в землі.

Блискавковідвід характеризується зоною захисту — частиною простору, навколо блискавковідводу, яка захищена від прямих ударів блискавки з відповідним ступенем надійності.

Таблиця 4.2 - Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км² поверхні землі залежно від інтенсивності грозової діяльності

Середня інтенсивність грозової діяльності, год/рік	10–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100 і більше
Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км ² поверхні землі	1	2	4	5,5	7	8,5

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Проведено аналітичний огляд сучасних систем теплових насосів, їх класифікації за типом джерела низькопотенційного тепла, принципу роботи та основних показників ефективності. Встановлено, що теплові насоси є однією з найефективніших технологій декарбонізації сектору опалення, забезпечуючи до 80% зниження викидів CO₂ порівняно з традиційними системами на викопному паливі.

2. Обґрунтовано вибір теплового насоса «повітря-вода» NIBE F2050-6 номінальною потужністю 6 кВт для дослідження. За результатами річного моніторингу за допомогою платформи myUplink встановлено, що загальне річне споживання електроенергії тепловим насосом односімейного будинку площею 85 м² у кліматичних умовах Чернігівщини становить 3480,99 кВт·год, при цьому понад 60% енергії споживається в період з листопада по лютий.

3. Встановлено, що попит на опалення приміщень має виражену лінійну залежність від зовнішньої температури з коефіцієнтом тепловтрат 165 Вт/°С, тоді як попит на гаряче водопостачання характеризується стабільним базовим навантаженням із незначною сезонною складовою (0,22 кВт).

4. Проведено апроксимацію залежності коефіцієнта корисної дії (COP) теплового насоса від температури зовнішнього повітря у формі, аналогічній циклу Карно. Встановлено, що в діапазоні температур від 3 °С до 21 °С значення COP змінюється від 2,8 до понад 5, що свідчить про суттєве зниження ефективності теплового насоса в холодний період року.

5. Встановлено фундаментальну сезонну невідповідність між виробництвом сонячної енергії та попитом на електроенергію для теплового насоса в умовах високих широт: максимальна фотоелектрична генерація

припадає на літній період, коли потреба в опаленні мінімальна, тоді як взимку, при піковому попиті на тепло, сонячна інсоляція є мінімальною.

6. Проведено математичне моделювання в MATLAB роботи комбінованої системи «фотоелектрична станція – акумулятор – тепловий насос» для різних конфігурацій: фотоелектричні системи потужністю 5–20 кВт та акумуляторні батареї ємністю 50, 100 та 150 кВт·год. Результати демонструють, що коефіцієнт самозабезпечення (SSR) зростає як зі збільшенням потужності фотоелектричної системи, так і зі збільшенням ємності акумулятора, причому вплив потужності фотоелектричних панелей на автономність системи є більш значущим, ніж ємності акумуляторної батареї.

7. Моделювання динаміки стану заряду акумуляторів різної ємності протягом п'ятирічного періоду виявило виражену сезонну циклічність: акумулятори досягають повного заряду в літні місяці та майже повністю розряджаються в грудні–січні. Навіть акумулятор ємністю 150 кВт·год у поєднанні з фотоелектричною системою потужністю 8 кВт не забезпечує енергетичної автономії в зимовий період.

8. Результати аналізу свідчать, що для приватного будинку площею 85 м² в кліматичних умовах Чернігівщини повне відключення від електромережі за рахунок лише фотоелектричної станції та акумуляторної батареї є недоцільним з економічної точки зору через принципову сезонну невідповідність між генерацією та споживанням. Раціональним рішенням є гібридна схема з обмеженим використанням мережевого підключення в зимовий період або введенням додаткового джерела енергії.

9. Результати роботи створюють науково-технічну базу для подальшого вдосконалення проєктування гібридних енергетичних систем «фотоелектрична станція – тепловий насос» для приватних будинків в умовах помірно-континентального клімату України та можуть бути використані при розробці рекомендацій з оптимального підбору потужності фотоелектричних панелей та ємності акумуляторних батарей залежно від кліматичних умов та енергетичних потреб об'єкта.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Xiao, B., He, L., Zhang, S., Kong, T., Hu, B., & Wang, R. Z. (2020). Comparison and analysis on air-to-air and air-to-water heat pump heating systems. *Renewable energy*, 146, 1888-1896.
3. Vijayan, D., & Raval, M. (2025). Seasonal Performance Analysis of an Off-Grid PV-Powered Heat Pump System Using Real-World Data.
4. Byrne, P., & Ghouali, R. (2019). Exergy analysis of heat pumps for simultaneous heating and cooling. *Applied Thermal Engineering*, 149, 414-424.
5. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій —, 25-26 листопада 2020 року.— Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.— С. 80–81
6. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С .
7. Creation and substantiation of the matrix for model series of tubular propeller turbines for small hydropower plants / Myroslav Zin, Vadym Koval, Mykola Tarasenko, Ivan Sysak // *Scientific Journal of TNTU*. — Tern. : TNTU, 2023. — Vol 109. — No 1. — P. 24–31.

8. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10
9. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.
10. Коваль В. П. Енергоефективність системи позиціонування фотоелектричних батарей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, Ю. О. Пилипчук // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 3. — С. 139.
11. Ensuring the energy efficiency of heat supply energy systems functioning by justifying the choice of glazing units for the external enclosing structures of buildings / Vadym Koval, Myroslav Zin, Liubov Kostyk, Oleh Buniak // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2023. — Vol 110. — No 2. — P. 57–67
12. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. — Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19.
13. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214. Галузь науки: технічні (17.03.2020)
14. Shahverdian, M. H., Soltanifar, F., Sohani, A., Sayyaadi, H., & Hoseinzadeh, S. (2025). A 3E comparative study to choose the best storage method for PV solar system for off-grid applications: Hydrogen or battery?. *Journal of Energy Storage*, 117, 116111.

15. Yunus A. Çengel, Boles, M. A., Kanoglu, M. and Kaya, M. (2023) Thermodynamics: An Engineering Approach, 9th edn. New York: McGraw-Hill.
16. Коваль В.П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів / В.П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, Л.М. Костик // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173
17. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.
18. Понтус О.В. Особливості проектування та введення в експлуатацію промислової сонячної електростанції // О.В. Понтус, Р.А. Карпишин, В.П.Коваль / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С 19-21.
19. Коваль В.П. Інтегрування електроавтомобіля у систему електроживлення будинку // В.П. Коваль, к.т.н. доц; А.В. Слободян; К.В. Слободян / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 36-37
20. Малушенко А.С. Перспектива зарядки електромобілів від відновлювальних джерел енергії // А. С. Малушенко; М.Б. Горват; В. П. Коваль / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 225.

21. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.

22. Керей Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керей, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68.

23. Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.

24. Коваль В. П., Зінь П. М. Підвищення енергоефективності низьконапірних мікрогес невеликої потужності з трубними осьовими гідротурбінами // Тези XIII МНПК „Актуальні задачі сучасних технологій“, Тернопіль, 11-12 грудня 2024 року. 2024. С. 285–286.

25. Гнатюк В.В. Роль систем зберігання електроенергії для енергосистеми // В.В. Гнатюк; В.І. Кузьмич; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 21-22.

26. Climate and Average Weather Year Round in Cherniyiv Ukraine. <https://weatherspark.com/y/91456/Average-Weather-in-Cherniyiv-Ukraine-Year-Round>.

27. NIBE Energy Systems. <https://www.nibe.eu/>

28. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.