

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: **СИСТЕМА «ВІТРОГЕНЕРАТОР-ТЕПЛОВИЙ НАСОС»
ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В УМОВАХ ХОЛОДНОЇ
КЛІМАТИЧНОЇ ЗОНИ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТс-41
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Балик П.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Куземко Н.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Золотий Р.З.
(підпис) (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)
« » 202_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 Балику Павлу Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система «вітрогенератор-тепловий насос» для теплопостачання
в умовах холодної кліматичної зони

Керівник роботи к.т.н., доц. Куземко Н.А.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «31» зрудня 2025 року № 4/7-1164

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Розробка системи енергопостачання на основі вітрогенератора
для теплового насосу в умовах холодного клімату

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

1. Опалення приміщень у холодних регіонах

2. Конфігурація теплового насоса

3. Розробка системи

4. Загальна ефективність системи

5. Результати розрахунків та їх аналіз

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

1. Накопичення теплової енергії

2. Автономний тепловий насос, що працює на вітровій енергії

3. Схема системи на основі вітрогенератора

4. Необхідна потужність турбіни

5. Енергетичний ККД запропонованої системи

6. Загальна енергоефективність запропонованої системи

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 _____ 02.01.2026 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 20.06.2026	

Студент _____
(підпис)

Балик П.Ю.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Куземко Н.А.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. – Т. : ТНТУ, 2026.

Стор. 65; рис. 13; табл. 11; креслень (презентацій) 16; джерел 31.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Система «вітрогенератор-тепловий насос» для теплопостачання в умовах холодної кліматичної зони».

Метою роботи є розробка системи енергопостачання на базі вітроенергетичної установки, яка може забезпечувати питною водою, гарячою водою для побутових потреб, опаленням приміщень, а також електроенергією для житлових потреб віддаленого населеного пункту в холодному регіоні.

У роботі проведено аналітичний огляд методів опалення приміщень у холодних регіонах, технологій накопичення теплової енергії та конфігурацій теплових насосів з електричним і механічним приводом. Розроблено багатофункціональну систему енергопостачання на базі вітрогенератора, яка інтегрує тепловий насос з морською водою як джерелом низькопотенційного тепла, установку опріснення води та підсистему хімічного накопичення енергії для забезпечення електропостачання, опалення, гарячого водопостачання та водопідготовки житлового комплексу в холодному регіоні. Проведено термодинамічний аналіз запропонованої системи з визначенням точок стану робочих тіл, енергетичного та ексергетичного коефіцієнтів корисної дії всіх компонентів системи. Виконано розрахунок теплового навантаження населеного пункту, визначити необхідну потужність вітрогенератора та провести порівняльний аналіз ефективності запропонованої системи з типовим повітряним тепловим насосом.

Ключові слова: ВІТРОГЕНЕРАТОР, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ, ТЕПЛОВИЙ НАСОС, ТЕПЛОВА ЕНЕРГІЯ, ВОДА

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	9
1.1 Опалення приміщень у холодних регіонах	9
1.2 Способи накопичення теплової енергії.....	12
1.2.1 Накопичення явного тепла	13
1.2.2 Накопичення прихованого тепла.....	15
1.2.3 Термохімічне накопичення	15
1.3 Отримання теплової енергії за допомогою вітру.....	16
1.3.1 Системи прямого перетворення енергії вітру на тепло	17
1.3.2 Конфігурація теплового насоса з електричним приводом.....	18
1.3.3 Конфігурація теплового насоса з механічним приводом.....	20
1.3.4 Ретардер.....	22
1.4 Висновки до розділу	23
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	25
2.1 Вітровий потенціал	25
2.2 Енергетичні показники споживачів	26
2.3 Опис запропонованої системи енергопостачання	27
2.4 Термодинамічний аналіз.....	30
2.4.1 Компресор 1	31
2.4.2 Теплообмінник гарячої води	32
2.4.3 Розширювальні клапани	32
2.4.4 Насос 1	33
2.4.5 Теплообмінник «повітря-вода».....	33
2.4.6 Компресор 2	34
2.4.7 Насос 2.....	35
2.4.8 Установа для опріснення	35
2.4.9 Насоси 3 і 4	36
2.4.10 Електролізер PEM	37

2.4.11 Загальна ефективність	38
2.4.12 Витрати та викиди окремих видів енергії.....	38
2.5 Висновки до розділу	40
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	42
3.1 Аналіз результатів розрахунків	42
3.2 Теплове навантаження населеного пункту.....	44
3.3 Загальна енергетична та ексергетична ефективність системи	48
3.4 Вартість енергії.....	49
3.5 Висновки до розділу	53
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	52
4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання.....	55
4.2 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання	56
4.3 Особливості проведення рятувальних та інших невідкладних робіт при ліквідації наслідків великих виробничих аварій і катастроф	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61

ВСТУП

Актуальність теми.

Світовий попит на енергію зріс унаслідок збільшення чисельності населення та зростання енергоспоживання на душу населення, що пов'язано з розвитком. За даними Організації Об'єднаних Націй, до 2050 року чисельність населення світу збільшиться на 47 %. Для задоволення високого світового попиту на енергію використовуються викопні види палива, такі як бензин, вугілля, гас та природний газ, що пов'язано з високими економічними та екологічними витратами. Близько 85% первинної енергії у світі отримують з викопних видів палива. Найбільшою проблемою викопних видів палива є викиди парникових газів (ПГ), які вони створюють, що спричиняє зміну клімату — екологічну кризу нашого часу.

За даними Міжнародного енергетичного агентства, за поточного сценарію політики прогнозується, що до 2040 року глобальний попит на первинну енергію зросте на 45%. Щодо енергетичного балансу, то за поточної політики викопне паливо становитиме 81% світового енергоспоживання, а викиди CO₂ до 2040 року сягнуть 44,1 Гт. Хоча частка викопного палива у світовому споживанні первинної енергії до 2040 року зменшиться до 79%, ця тенденція до зростання триватиме. З огляду на ці прогнози, існує потреба у створенні низьковуглецевих систем відновлюваної енергії, особливо з огляду на те, що витрати на видобуток газу та нафти продовжують зростати. Отже, відновлювана енергія є найнадійнішим та найвигіднішим варіантом для пом'якшення нинішньої загрози, яку становить CO₂ для навколишнього середовища.

Прогнозується, що споживання енергії на опалення продовжуватиме зростати. Однак відновлювані джерела енергії відіграють незначну роль в опаленні, не враховуючи традиційне використання біомаси для опалення приміщень та приготування їжі. Деякі комерційно доступні технології відновлюваних джерел енергії можуть забезпечити екологічну, стійку та

економічну енергію для опалення і, за наявності відповідних стимулів, можуть конкурувати з джерелами теплової енергії на основі викопного палива. До них належать теплові насоси, електромобілі та сонячні панелі.

Вітроенергетика є усталеною технологією і є дешевшою за сонячну енергетику завдяки своїй високій ефективності, але початкові інвестиції та витрати на обслуговування вітроенергетики можуть бути вищими, ніж у сонячній. У кількох дослідженнях розглядалося перетворення вітрової енергії на електричну. Однак набагато менше досліджень присвячено прямому перетворенню кінетичної енергії вітру на теплову енергію для опалення приміщень та гарячого водопостачання. У цій роботі розглянуто застосування вітрової енергії для опалення приміщень безпосередньо в холодних регіонах.

Мета кваліфікаційної роботи: розробка системи енергопостачання на базі вітроенергетичної установки, яка може забезпечувати питною водою, гарячою водою для побутових потреб, опаленням приміщень, а також електроенергією для житлових потреб віддаленого населеного пункту в холодному регіоні.

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

1. Провести аналітичний огляд методів опалення приміщень у холодних регіонах, технологій накопичення теплової енергії та конфігурацій теплових насосів з електричним і механічним приводом.
2. Розробити багатофункціональну систему енергопостачання на базі вітрогенератора, яка інтегрує тепловий насос з морською водою як джерелом низькопотенційного тепла, установку опріснення води та підсистему хімічного накопичення енергії для забезпечення електропостачання, опалення, гарячого водопостачання та водопідготовки житлового комплексу в холодному регіоні.
3. Провести термодинамічний аналіз запропонованої системи з визначенням точок стану робочих тіл, енергетичного та ексергетичного коефіцієнтів корисної дії всіх компонентів системи.

4. Виконати розрахунок теплового навантаження населеного пункту, визначити необхідну потужність вітрогенератора та провести порівняльний аналіз ефективності запропонованої системи з типовим повітряним тепловим насосом.

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 – 65 арк. формату А4, графічна частина – 16 аркушів презентації.

Кваліфікаційна робота виконана відповідно до вимог [1].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Опалення приміщень у холодних регіонах

На будівельний сектор наразі припадає близько 30 % світового споживання енергії та 47 % енергії, що використовується для опалення. У міру зростання населення та ВВП попит на енергію для опалення приміщень, особливо в холодних регіонах, відповідно збільшуватиметься.

Наразі значна частка навантаження на опалення в холодному кліматі покривається за рахунок викопного палива в печах, що безпосередньо сприяє значній частці викидів. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), близько 37% світових викидів CO₂ припадає на будівельний сектор, якщо враховувати етапи будівництва та експлуатації. Таким чином, опалення приміщень суттєво сприяє переважаючим викидам парникових газів.

Використання енергії для опалення приміщень залежить від площі приміщень та постійного зростання кількості домогосподарств. Для зменшення викидів у будівельному секторі наразі застосовуються різні методи та технології енергоефективності.

З метою зменшення енергоспоживання на опалення приміщень було проведено кілька досліджень, спрямованих на вдосконалення існуючих методів або технологій опалення. Наприклад, Чжан та ін. [2] запропонували геотермальний тепловий насос, що працює за рахунок тепла, витягнутого з повітропроводів традиційної системи опалення, а потім витягує тепло з геотермального джерела. За повідомленнями, система здатна підвищити ефективність традиційної системи на 54%, а також зменшити щорічні експлуатаційні витрати майже на 30%.

Крім того, Хамада та ін. [3] провели польове дослідження фактичної ефективності системи опалення приміщень, яка використовує паливий фундамент будівлі як теплообмінники для кондиціонування повітря в приміщеннях. Вони повідомили про загальний коефіцієнт корисної дії (ККД)

3,2 та зниження енергоспоживання під час опалювального періоду на 23,2%. У подібному дослідженні автори вивчали ефективність технології геотермальних паль на території кампусу Університету Манітоби. Система забирає енергію з тепловтрат у палях і передає її до системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) у будівлі. Хоча геотермальні палі здебільшого використовуються для опалення взимку в холодних регіонах, їх використання обмежується тим, що вони дуже чутливі до теплового дисбалансу.

Крім того, у роботі, представленій у [4], досліджували ефективність чотирьох методів опалення на основі результатів, отриманих під час польових вимірювань. Автори розглянули роботу системи сонячних колекторів, геотермального теплового насоса, газового котла та котла на біомасі, розташованих у житловому будинку. На основі їхніх досліджень було показано, що сонячний колектор має діапазон ККД 12,5%–7,4%, система теплового насоса має річний ККД 3,5–3,8, газовий котел працює в діапазоні 77,5%–82,2%, а ККД котла на біомасі коливається від 30% до 50%. Отримані результати показали, що відновлювані джерела енергії можуть забезпечити найбільшу частку потреб у тепловій енергії житлових будинків.

Крім того, у дослідженні вивчалася можливість рекуперації тепла, що генерується в центрі обробки даних, за допомогою кондиціонера з термосифоном. Отримані результати показали, що рекуперованого тепла було достатньо для значного зниження енергоспоживання на опалення та охолодження як центру обробки даних, так і самої будівлі.

Ефективність сонячного теплового насоса, що базується на непрямому розширенні вуглекислого газу як холодоагенту, досліджується в [6]. З метою оцінки ефективності та повного розуміння системи було розроблено модель з використанням одноступеневого транскритичного циклу CO₂, двоступеневого транскритичного циклу CO₂ та традиційного одноступеневого циклу R410a для опалення приміщень у Торонто. Експлуатаційні зміни трьох систем були змодельовані, порівняні та представлені за допомогою цих моделей з

урахуванням сонячної теплової системи, резервуара та потужності компресора теплового насоса. За даними, двоступенева система показала кращі результати, ніж в інших холодних регіонах.

Крім того, автори в [7] запропонували систему генерації теплової енергії, що складається з вітрогенератора, теплового насоса та ставка. Було проаналізовано три різні конфігурації запропонованої системи: тепловий насос, що працює на вітрі, інтегрований зі ставком як випарником; вітрогенератор і тепловий насос без ставка; та тепловий насос, що працює на електроенергії з мережі. На основі термодинамічного аналізу було повідомлено, що запропонована система теплового насоса, що працює на вітровій енергії та інтегрована зі ставком, перевершує інші конфігурації за загальним коефіцієнтом корисної дії, екзергією та теплоємністю. Концептуальний проект системи показано на рисунку 1.1.

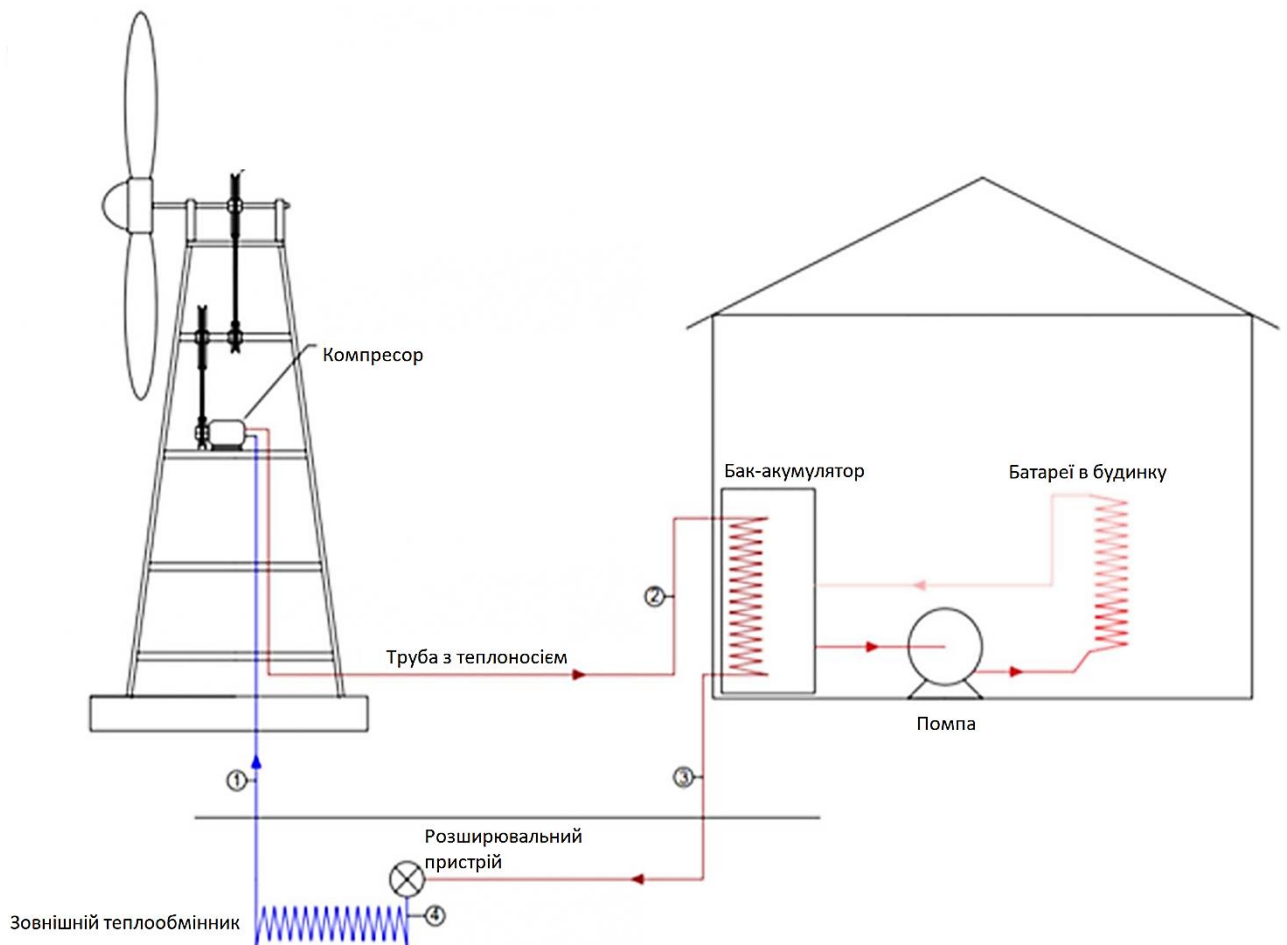


Рисунок 1.1 – Система теплової енергії з прямим вітровим приводом для холодних регіонів [7]

1.2 Способи накопичення теплової енергії

Споживання первинної енергії продовжує зростати в геометричній прогресії. Це, у поєднанні з негативним впливом викопних ресурсів на навколишнє середовище, призвело до значного зростання інтересу до переходу на стійкі джерела енергії. Для поліпшення природної рівноваги та задоволення потреб зростаючого населення самодостатні джерела енергії, такі як сонячне випромінювання, океанічні течії, вітер та біогаз, продовжують відігравати значну роль. Однак засоби для накопичення цих переривчастих видів енергії стали вкрай необхідними [8,9]. Це вимагає розробки ефективних та дієвих методів накопичення енергії.

Накопичення теплової енергії охоплює кілька технологій, і його функціонування базується на накопиченні енергії в накопичувальному середовищі шляхом охолодження або нагрівання для потреб побутового та промислового опалення, а також для виробництва електроенергії. Накопичення теплової енергії (TES) переважно використовується в будівлях та промислових процесах. Тепло можна накопичувати в діапазоні температур від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Переваги включення НТП до енергетичного балансу включають підвищення загальної ефективності, надійності та економічної ефективності, зниження інвестиційних та експлуатаційних витрат, а також зменшення забруднення навколишнього середовища, що означає зниження викидів вуглекислого газу.

Існує три різні технології накопичення теплової енергії. Це термохімічне, чутливе до тепла та латентне накопичення. Вони мають різні принципи роботи. Системи накопичення чутливого тепла наразі доступні у комерційних обсягах і знаходяться на значно більш просунутій стадії розвитку, тоді як латентне накопичення тепла та термохімічне накопичення все ще перебувають у зародковому стані та проходять демонстрацію. Таблиця 1.1 показує порівняння різних систем TES, а на рисунку 1.2 показано різні матеріали, що

використовуються для накопичення енергії в різних технологіях.

Таблиця 1.1 – Характеристики та порівняння систем TES [10]

Параметри	Явне тепло	Приховане тепло	Термохімічне
Енергетична щільність	Низька: – 50 кВт·год/м ³	Середня: – 100 кВт·год/м ³	Висока: – 500 кВт·год/м ³
Ступінь зрілості	Промисловий масштаб	Стадія випробувань	Лабораторний масштаб
Транспортування	Короткі відстані	Короткі відстані	Теоретично необмежена відстань
Технологія	Проста	Середня	Складна
Період зберігання	Існує обмеження через теплові втрати	Існує обмеження через теплові втрати	Необмежений
Температура	Температура накопичення під час заряджання	Температура накопичення під час заряджання	Температура навколишнього середовища

1.2.1 Накопичення явного тепла

Цей тип накопичення теплової енергії використовує зміни температури процесу або матеріалу під час накопичення та розряджання. Цей метод накопичення тепла є дуже вигідним, оскільки процес є повністю оборотним. Це робить його легко застосовним до всіх видів опалення, таких як побутові системи, промислові процеси та централізоване опалення. Кількість накопиченої енергії залежить від теплоємності матеріалу, і метод теплоізоляції, що застосовується, є дуже важливим при використанні цієї технології.

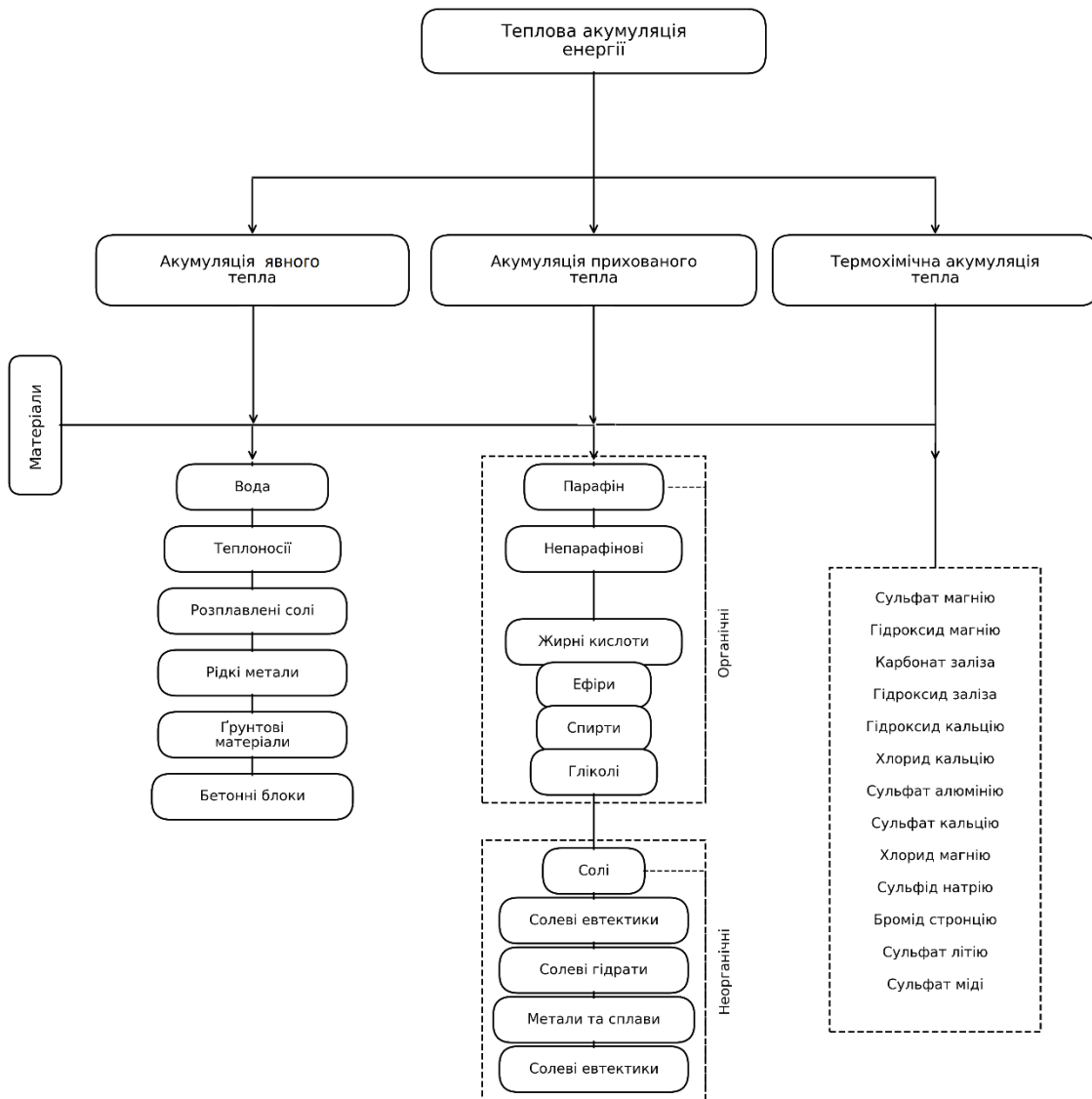


Рисунок 1.2 – Різні матеріали, що використовуються для накопичення енергії

Системи накопичення явного тепла використовують великий об'єм для накопичення через низьку енергетичну щільність (таким чином, вони мають приблизно в 3–5 разів нижчу енергетичну щільність, ніж технології PCM та TCS). Рівняння 1.1 відображає явне тепло, Q , накопичене матеріалом масою m :

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} C_p \cdot dT \quad (1.1)$$

де T_1 та T_2 – температури заряджання та розряджання процесу відповідно, C_p – питома теплоємність матеріалу або середовища.

1.2.2 Накопичення прихованого тепла

Якщо потрібні вищі енергетичні щільності та більш стабільні температури для вивільнення, явне нагрівання більше не є економічним способом накопичення, а отже, використовується накопичення теплової енергії за допомогою матеріалів із фазовим переходом (PCM). PCM забезпечують величезну теплову потужність у вузькому діапазоні температур і можуть діяти як майже ізотермічний резервуар для накопичення тепла. PCM змінюють фазу з твердої на рідку, коли температура підвищується. Оскільки це ендотермічний процес, тепло поглинається. PCM також можуть оборотним чином переходити з рідкого стану в твердий при зниженні температури, виділяючи тепло. PCM, як правило, є поганими провідниками енергії, через що заряджання та розряджання тривають так довго. Рівняння 1.2 відображає теплову енергію, накопичену PCM [11]:

$$Q = m \left[\int_{T_1}^{T_m} C_{ps} \cdot dT + \Delta h + \int_{T_m}^{T_2} C_{pl} \cdot dT \right] \quad (1.2)$$

де T_m , C_{ps} , Δh та C_{pl} — це, відповідно, температура точки плавлення, питома теплоємність матеріалу або середовища у твердій фазі, ентальпія та питома теплоємність у рідкій фазі. T_1 та T_2 мають ті ж значення, що й у рівнянні 1.1.

1.2.3 Термохімічне накопичення

Цей тип накопичення енергії базується на накопиченні енергії за допомогою хімічних реакцій. Реакції, що характеризують цю систему, є оборотними. TES пропонує більші ємності накопичення, ніж PCM та SHS. Хоча TES значною мірою все ще перебуває на стадії розробки, вона має потенціал стати лідером серед технологій накопичення теплової енергії після повного впровадження. Для демонстрації цієї технології Шмідт та Ліндер [12] запропонували нову систему довгострокового накопичення теплової енергії, що використовує хімічний, термічний розклад гідроксиду кальцію. За цією

концепцією $\text{Ca}(\text{OH})_2$ розкладається на CaO та водяну пару на основі оборотної реакції:



Якщо є надлишок енергії, гідроксид розкладається на оксид (фаза заряджання).

Конденсація дозволяє легко відокремити вивільнені водяні пари від твердої речовини. Енергія, що міститься в хімічному потенціалі оксиду кальцію, може зберігатися протягом нескінченного часу. Коли енергія стає необхідною, рідка вода або водяні пари знову вступають у реакцію з оксидом кальцію, і в результаті екзотермічної реакції вивільняється енергія для використання (фаза розряджання). Вони розробили концептуальну систему децентралізованого довгострокового зберігання енергії.

1.3 Отримання теплової енергії за допомогою вітру

Отримання теплової енергії за допомогою вітру ще не було широко досліджено, і його економічна та технічна доцільність залишається неясна. Накопичення теплової енергії за допомогою вітрової енергії зосереджується на перетворенні вітру на тепло, яке можна економічно накопичувати майже незалежно від місця розташування. Ця технологія відкриває перспективу періодичного перетворення енергії вітру на розподільне відновлюване джерело енергії, доступне за запитом. Як результат, накопичення теплової енергії за допомогою вітрової енергії може забезпечити надійну потужність, здатну задовольнити стратегічні енергетичні цілі, пов'язані з безпекою постачання та екологічною стійкістю.

Різні варіанти отримання теплової енергії за допомогою вітрової енергії можна отримати шляхом поєднання окремих технологій, що є в наявності на даний момент, але які досі не розглядалися разом у складі цілісної системи: високотемпературні теплогенератори, теплові механізми та високотемпературні теплоаккумулятори. Однак вони ніколи не розглядалися разом як цілісна

система. Це дозволить поєднати системні переваги парових електростанцій із використанням енергії вітру, тим самим зменшивши потребу в інвестиціях у диспетчеризовані потужності електроенергії.

Для розробки економічної системи перетворення вітрової енергії можна використовувати наявні на сьогодні теплогенератори, такі як теплові насоси, електричні котли та ретардери. Крім того, правильний технічний вибір враховує всі основні елементи, а деякі джерела енергії та способи її використання є іншими важливими факторами для ідеального накопичення тепла. Нарешті, для перетворення тепла в електроенергію можна використовувати традиційні теплові двигуни, такі як ті, що застосовуються на традиційних парових електростанціях.

Генерація тепла за допомогою вітрової енергії може здійснюватися опосередковано або безпосередньо. Пряме виробництво тепла передбачає безпосереднє перетворення енергії вітру на теплову енергію без використання електричного генератора. Виробництво тепла відбувається в гондолі вітрогенератора. На відміну від прямого виробництва, електричний генератор повинен перетворити енергію вітру на електроенергію, а потім використовувати її для непрямого виробництва тепла.

1.3.1 Системи прямого перетворення енергії вітру на тепло

Ця концепція виробництва тепла передбачає перетворення обертального руху вітру на тепло. Додаткове виробництво тепла має ту перевагу, що теплогенератор не повинен розташовуватися поблизу основного теплосховища, яке транспортує електроенергію. Виробництво високих температур та накопичення теплової енергії з перекачуванням можна забезпечити за допомогою електричних теплових насосів для досягнення найбільш ефективного перетворення енергії на тепло та електроенергію. Цей тип виробництва тепла здебільшого використовує гідродинамічні/індукційні ретардери або теплові насоси з механічним приводом.

1.3.2 Конфігурація теплового насоса з електричним приводом

У цій конфігурації котел замінюється тепловим насосом, який також працює на електроенергії.

Головною особливістю цієї концепції є використання теплового насоса. Як і електричні котли, теплові насоси з електричним приводом можна майже миттєво переводити з режиму простою на режим повного навантаження, що є корисною властивістю для WTES. Теплові насоси використовують у 2-5 разів менше електроенергії для виробництва такої ж кількості тепла, як електричний котел. Хоча загалом література щодо накопичення вітрової теплової енергії є дуже мізерною, декілька авторів досліджували цю техніку накопичення вітрової енергії. Наприклад, деякі автори досліджували адаптивну потужність окремої вітрової турбіни, підключеної до теплового насоса та електричної системи накопичення для постачання тепла в односімейних будинках.

Вони продемонстрували, що через переривчастий характер вітрової енергії потреби теплового насоса в електроенергії не завжди можуть бути задоволені. Це підкреслює цінність накопичувального пристрою, а також необхідність обережної конфігурації вітрогенератора для мінімізації розбіжностей між попитом і пропозицією. Запропонована система показана на рисунку 1.3.

Інші дослідження перетворення електроенергії на тепло в Скандинавії, що стосуються постачання централізованого теплопостачання, зосереджуються переважно на використанні теплових насосів. Наприклад, Мюнстер та ін. досліджували роль централізованого теплопостачання в переході Данії на відновлювані джерела енергії. Вони виявили, що розширення централізованого теплопостачання є фінансово доцільним, оскільки воно забезпечує економічно ефективні способи включення більшої кількості вітрової енергії за допомогою потужних теплових насосів із накопичувачами теплової енергії для використання надлишкової енергії від вітрогенераторів, коли вітер дме з

великою силою [13]. Крім того, Хедегаард і Мюнстер [14] досліджували економічну доцільність інтеграції великої кількості теплових насосів, що працюють на вітровій енергії, у будівельний сектор. Вони продемонстрували, що теплові насоси можуть допомогти фінансувати інвестиції у вітроенергетику, одночасно знижуючи вартість обладнання.

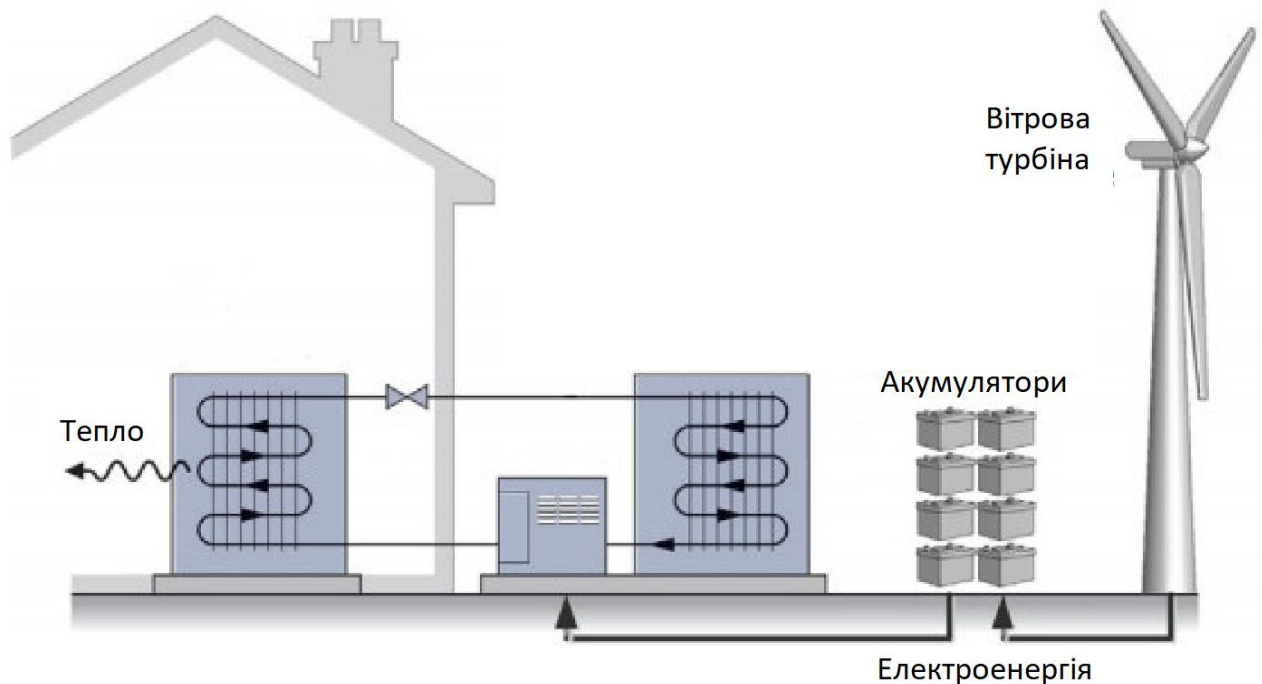


Рисунок 1.3 – Автономний тепловий насос, що працює на вітровій енергії

Рік та ін. провели техніко-економічне обґрунтування використання теплового насоса, що працює від вітрогенератора та сонячної фотоелектричної системи, для окремих будинків у Німеччині. Використовувався тепловий насос, з'єднаний із накопичувальним баком. Автори застосували моделювання для зображення стратегій інтеграції відновлюваних джерел енергії в різних регіонах Німеччини, одночасно зменшуючи необхідність зупинки вітрогенераторів або подачі електроенергії в мережу. Моделюється енергоспоживання окремого будинку. Як джерело енергії використовуються різні вітрогенератори та фотоелектричні системи. Вимірюється рентабельність цих систем та порівнюється з традиційними газовими або нафтовими системами. Згідно з отриманими результатами, за нинішніх умов малі вітрогенератори є

реалістичним варіантом для задоволення попиту на електроенергію. З іншого боку, фотоелектричні станції наразі не підходять для задоволення попиту на тепло, оскільки їхні базові витрати вищі, ніж у традиційних систем.

1.3.3 Конфігурація теплового насоса з механічним приводом

Це технологія прямого накопичення теплової енергії вітру, що базується на перетворенні енергії вітру на теплову енергію без використання електричного генератора. Тут енергія вітру на лопатях турбіни перетворюється безпосередньо на енергію обертання на валу перетворювача енергії та використовується для живлення теплового насоса безпосередньо через вал компресора. Однак ця система вимагає редуктора, оскільки енергія обертання перетворювача енергії вітру, як правило, є нижчою.

Для демонстрації цієї техніки Клутер і Ліледаль [15] провели техніко-економічне обґрунтування теплового насоса для молочної ферми з механічним приводом. Система складалася з вітротурбіни, механічно з'єднаної для приводу холодильного компресора, що використовується на молочній фермі. Система охолоджує льодогенератор, достатньо великий, щоб забезпечити льодом для охолодження молока, якого вистачить щонайменше на три дні. Холодильний компресор прикріплений до вітрогенератора через систему механічного приводу. Холодоагент з компресора охолоджується холодною водою під час проходження через водяний конденсатор. Нагріта вода надходить у бак для гарячої води. Холодоагент з конденсатора направляється до ресивера, потім через відповідний розширювальний клапан — до трубопроводу льодогенератора, і нарешті повертається до компресора. Льодяна вода з льодогенератора циркулює в протипотоковому теплообміннику з паралельними пластинами, охолоджуючи тепле молоко з доїльної машини. Потім охолоджене молоко зберігається в закритому резервуарі для молока. Концептуальний план запропонованої системи показано на рисунку 1.4.

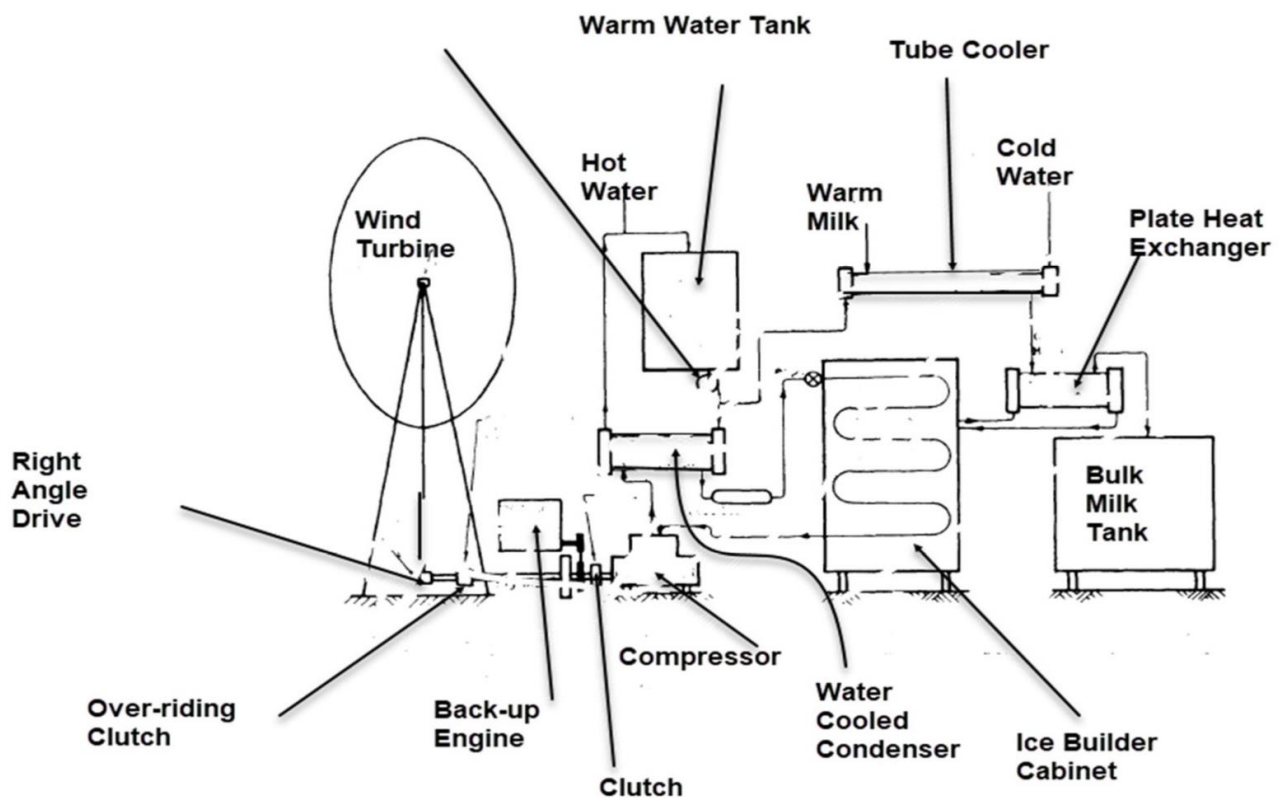


Рисунок 1.4 – Загальна схема системи вітрового теплового насоса для молочної ферми (мовою оригіналу [15])

Jwo та ін. [16] розробили систему вітрової теплової енергії, безпосередньо підключену до примусового теплового насоса, та проаналізували її ефективність. Система використовує чотириходовий клапан для керування роботою механізму теплового насоса, який перемикається між охолоджувачем та тепловим насосом. На основі теоретичних та експериментальних досліджень вони повідомили, що традиційна система, в якій тепловий насос безпосередньо живиться примусовим вітром, має теоретичну ефективність 42,19 відсотка. Стандартне значення ефективності генерації охолоджувальної води при температурі в приміщенні 25 °C та зовнішній температурі 35 °C становило 54,38 відсотка, а ефективності генерації гарячої води при температурі в приміщенні та зовнішній температурі 10 °C – 52,25 відсотка. Запропонована система змогла підвищити ефективність на 10 відсотків як для охолодження, так і для опалення, як показано на рисунку 1.5.

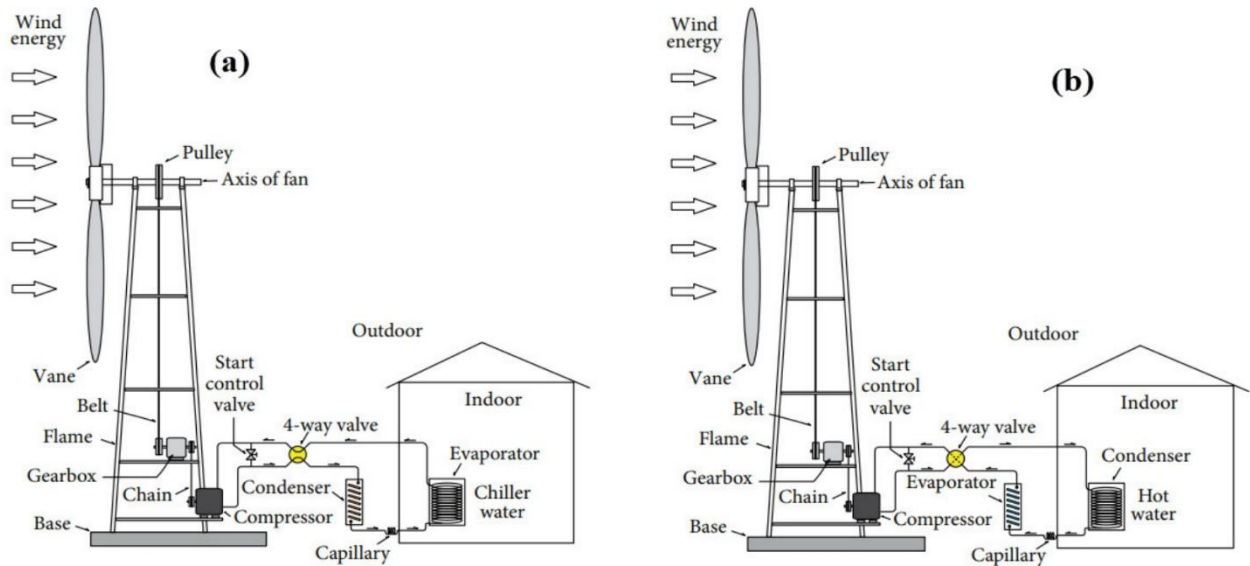


Рисунок 1.5 – Тепловий насос з прямим приводом від вітру: (а) охолоджувач для літа, (б) тепловий насос для зими (мовою оригіналу [16])

У подібному дослідженні інші автори запропонували розробку охолоджувача, що працює на вітровій енергії. Ця техніка прямого перетворення вітрової енергії для живлення охолоджувача призначена для уникнення втрат, пов'язаних із традиційним процесом перетворення вітрової енергії з механічної на електричну. Зазначалося, що запропонована система підвищує ефективність порівняно з непрямим методом охолодження від вітрогенератора. Вони повідомили про ефективність охолоджувача на рівні 21,28 %.

1.3.4 Ретардер

Усі характеристики, перелічені в концепції конфігурації теплового насоса з механічним приводом щодо припущень щодо перетворювача вітрової енергії, є ідентичними в цій концепції. Цей метод використовує енергію обертання валу вітрогенератора, яка перетворюється безпосередньо на теплову енергію, в даному випадку за допомогою ретардера, безпосередньо приєднаного до валу вітроустановки. Для порівняння різних номінальних потужностей передбачається, що всі необхідні ретардери з'єднані послідовно.

Для роботи агрегату в оптимальному режимі ретардера необхідна

редукторна коробка, оскільки вона забезпечує номінальну потужність при частоті обертання від 700 до 1500 об/хв. Існує приклад такої системи, що використовує гальмівну систему для перетворення вітру в теплову енергію. Тепло, що утворюється в цьому процесі, передається теплоносієм до накопичувального бака, який може бути використаний пізніше для виробництва електроенергії або для опалення приміщень.

1.4 Висновки до розділу

Аналіз літератури показує, що серед різних джерел відновлюваної енергії для опалення вітер загалом вважається тим, що має найбільший потенціал. Незважаючи на величезний потенціал вітру для опалення приміщень, огляд літератури малює дещо неоднозначну картину його здатності замінити традиційні печі, особливо в холодних регіонах, через обмеженість досліджень. Лише декілька дослідників вивчали потенціал вітротеплових систем. Однак вони зосередили свої дослідження на непрямих вітротеплових системах, які використовують посередника (електричний генератор), що сприяє більшим втратам. Прямі вітротеплові системи майже не вивчалися, незважаючи на їхню перевагу над непрямыми системами, особливо їх інтеграцію з системою теплового насоса.

1. Встановлено, що на будівельний сектор припадає близько 30 % світового споживання енергії та 47 % енергії, що використовується для опалення.

2. Проведений аналіз досліджень у галузі опалення приміщень у холодних регіонах свідчить про ефективність застосування геотермальних теплових насосів (підвищення ефективності системи на 54 %), паливних фундаментів (зниження енергоспоживання на 23,2 %) та сонячних колекторів (ККД у діапазоні 7,4–12,5 %).

3. Розглянуто три технології накопичення теплової енергії: явне тепло, приховане тепло з використанням матеріалів із фазовим переходом та термохімічне накопичення. Для системи «вітрогенератор-тепловий насос» перспективним є використання явного тепла через технологічну простоту та комерційну доступність.

4. Встановлено, що накопичення теплової енергії за допомогою вітру є недостатньо дослідженим напрямом, хоча має значний потенціал для забезпечення надійного теплопостачання в холодних кліматичних зонах.

5. Проаналізовано конфігурації теплових насосів з електричним та механічним приводом. Теплові насоси з електричним приводом демонструють гнучкість роботи та можливість інтеграції з мережею, тоді як механічний привід забезпечує безпосереднє використання енергії обертання валу вітрогенератора без втрат у генераторі та інверторі. Експериментальні дослідження підтверджують можливість підвищення ефективності прямого приводу на 10 % порівняно з традиційними системами.

6. Ретардери та гідродинамічні перетворювачі як елементи прямого перетворення вітрової енергії в тепло дозволяють досягати номінальної потужності при частоті обертання 700–1500 об/хв і є перспективними для інтеграції в автономні системи теплопостачання.

7. Встановлено, що більшість досліджень зосереджено на непрямих вітротеплових системах із використанням електричного генератора, тоді як прямі вітротеплові системи, особливо в інтеграції з тепловим насосом, практично не вивчені. Це зумовлює актуальність розробки системи «вітрогенератор-тепловий насос» з механічним приводом для умов холодної кліматичної зони.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вітровий потенціал

Важливо зазначити умови температури та швидкості вітру в навколишньому середовищі обраного для цього дослідження місця — міста Резолют. На рисунках 2.1 та 2.2 наведено середні температури повітря та моря, а також середні швидкості вітру для цієї локації. Цікаво відзначити, що температура моря залишається незмінною на рівні близько 10 °С протягом усього року.

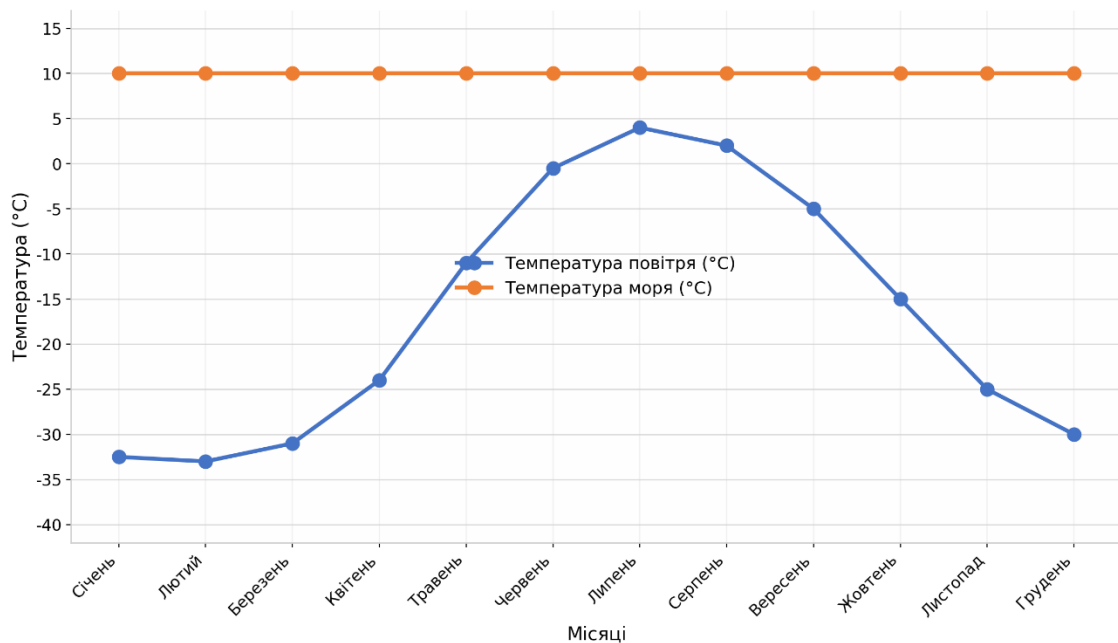


Рисунок 2.1 – Середньомісячна температура моря та повітря

Це є позитивним фактором, оскільки забезпечує теплову стабільність для роботи інтегрованої системи та надійне джерело тепла з навколишнього середовища, особливо в зимові місяці. Це контрастує з температурою повітря, яка різко коливається протягом року: від -33 °С у лютому до 4 °С у липні. Такі коливання вимагають, щоб система працювала в широкому діапазоні умов експлуатації для однієї і тієї ж місцевості. Швидкість вітру коливається від мінімальних 5,6 м/с до максимальних 6,7 м/с протягом усього року. Це хороша

швидкість вітру для вітрогенератора, оскільки швидкість запуску більшості вітрогенераторів, включаючи обрані моделі, становить 3 м/с.

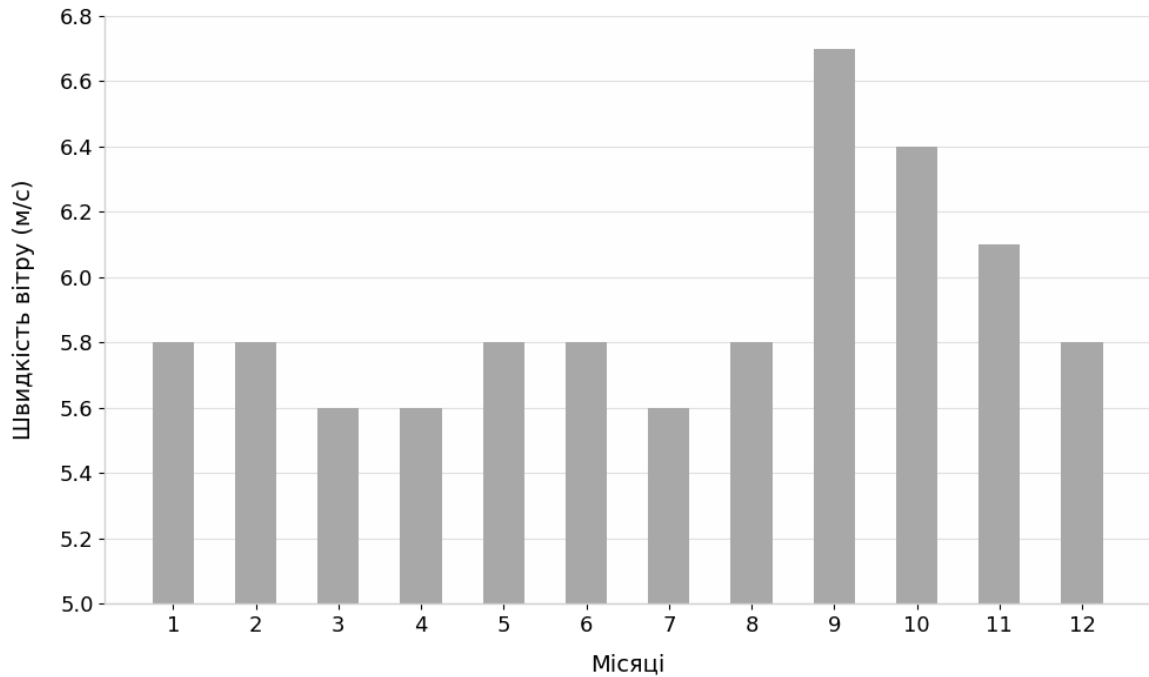


Рисунок 2.2 – Середньомісячна швидкість вітру

2.2 Енергетичні показники споживачів

Запропонована система повинна відповідати вимогам невеликої житлової громади в м. Резолют. Громада складається з шестиповерхового комплексу з десятьма квартирами на кожному поверсі, загалом 60 одиниць. Передбачається, що в кожній одиниці проживає одна особа, яка зазвичай має побутові прилади, що генерують відчутне тепло, такі як духовки, мікрохвильові печі, комп'ютери, телевізори та холодильники. Площа кожної одиниці становить 3 м x 3,7 м x 15 м. У кімнаті є одне розсувне вікно з подвійним склінням та алюмінієвим тепловим розривом. У таблиці 2.1 наведено внутрішнє теплове надходження від об'єктів, що перебувають в приміщенні. Розміри кожного вікна вважаються 1 м x 1 м, що дає загальну площу 1 м² на вікно. На фасаді будівлі є двоє дверей, які є подвійними дверями з тамбуром з навітряного боку розміром 2,06 x 1,52 метра кожна.

Було встановлено, що необхідна об'ємна витрата опрісненої води для

громади з 60 осіб становить 18 м³/день. Ця цифра була отримана на основі припущення, що для комфорту однієї людини в домашніх умовах потрібно 0,303 м³/день води з системи опріснення. Метою було досягти мінімальної потреби в електроенергії 280 кВт та теплового навантаження 460 кВт для задоволення унікальних технічних характеристик системи на основі розрахунку за стандартом 210/240 Інституту кондиціонування, опалення та охолодження (AHRI) [17].

Таблиця 2.1 – Теплова потужність пристроїв [17]

Середній	Теплонакопичення (Вт)
Особа, що веде сидячий спосіб життя (латентне тепло)	45
Особа, що веде сидячий спосіб життя (явне тепло)	72
Телевізор	80
Середні побутові прилади на м ²	35
Духовка	710
Комп'ютер	65
Мікрохвильова піч	690
Холодильник	690

2.3 Опис запропонованої системи енергопостачання

Проектована вітроенергетична система, яка генерує декілька видів енергоресурсів, показана на рисунку 2.3. Система вироблятиме чотири види енергоресурсів, включаючи електроенергію безпосередньо від вітрогенераторів, водень для хімічного накопичення енергії, опалення приміщень та прісну воду. Система живиться від вітрогенератора, який виробляє електроенергію для громади та двох компресорів. Перший компресор — це відкритий компресор, який використовує кінетичну енергію вітру від вітрогенератора для теплового насоса, щоб забезпечити опалення приміщень громади, а другий компресор

постачає тепло до багатоефектної установки опріснення для виробництва чистої питної води для громади. Надлишок електроенергії зберігається у хімічній формі за допомогою електролізера з протонно-обмінною мембраною (РЕМ) для отримання водню шляхом електрохімічної реакції, яка називається електролізом води. Це підсистема накопичення енергії запропонованої системи.

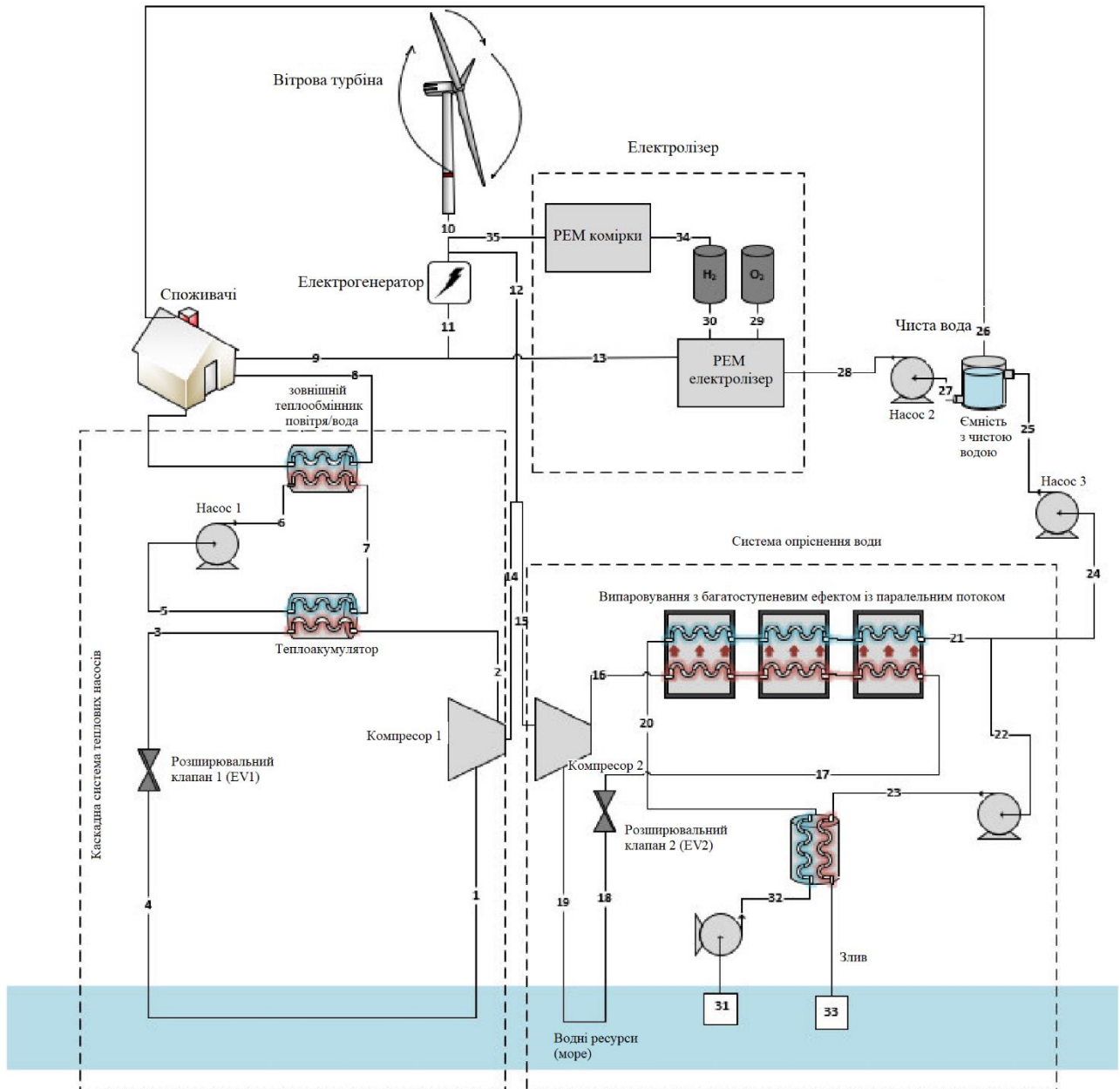


Рисунок 2.3 – Проектована вітроенергетична система, яка генерує декілька видів енергоресурсів та опріснює воду

Система теплового насоса починає працювати, коли холодоагент, що

надходить у компресор 1 (Comp 1) у стані 1, стискається до стану 2. Перегрітий газоподібний холодоагент, що подається компресором, надходить у конденсатор (теплообмінник гарячої води), віддаючи тепло воді в резервуарі та конденсуючись до стану 3. Протікаючи через розширювальний клапан, рідкий холодоагент розширюється до стану 4. Суміш рідкого та газоподібного холодоагенту продовжує текти всередині випарника (тобто моря), де вона отримує тепло від навколишнього середовища, що призводить до випаровування холодоагенту назад до стану 1. Потім газоподібний холодоагент надходить у всмоктувальний отвір компресора, тим самим замикаючи цикл. Слід ще раз наголосити, що основною метою використання морської води є підтримання температури навколишнього середовища на рівні 10 °C незалежно від того, наскільки низькою є температура зовнішнього повітря. Теплова енергія накопичується в баку для гарячої води, звідки вона використовується для опалення приміщень за потреби.

Далі розглянемо багатоефективну установку для опріснення води. Морська вода перекачується під високим тиском і при температурі навколишнього середовища, що тут представлено як стан 21. Холодоагент, що надходить у компресор 2 у стані 19, стискається до стану 16. Перегрітий газоподібний холодоагент, що подається компресором, надходить у конденсатор (установку для опріснення), віддаючи теплову енергію морській воді під час конденсації до стану 17. Протікаючи через розширювальний пристрій, рідкий холодоагент розширюється до стану 18. Суміш рідкого та газоподібного холодоагенту продовжує текти всередині випарника (тобто моря), де вона отримує тепло від навколишнього середовища, що призводить до випаровування холодоагенту назад до стану 19. Компресор 2 живиться від вітрогенератора і постачає тепло до установки опріснення. Потік морської води проходить три етапи опріснення, в результаті чого утворюються два продукти: вода та розсіл. Розсіл повертається назад у море. Прісна вода розділяється на два потоки: один для побутового використання, а інший електрохімічно розщеплюється на водень та кисень на відповідних електродах у процесі

електролізу води за технологією PEM, причому водень утворюється на катоді, а кисень — на аноді.

Електроліз води за технологією PEM відбувається, коли вода подається до анода і розщеплюється на кисень, протони та електрони. Ці протони переміщуються до катода через протонопровідну мембрану. Електрони залишають анод через зовнішній ланцюг живлення, що забезпечує реакцію рушійною силою. Протони та електрони рекомбінують на катоді, утворюючи водень. Водень зберігається для використання як резервне джерело енергії в паливних елементах PEM. Електролітом паливних елементів PEM, також відомих як паливні елементи з протонно-обмінною мембраною, є протонно-провідна полімерна мембрана. Ці елементи можуть працювати при низьких температурах і швидко змінювати свою потужність, щоб задовольнити мінливі потреби в електроенергії. Це буде використовуватися для генерації електроенергії, а також для живлення транспортних засобів, якщо немає вітру.

2.4 Термодинамічний аналіз

Перш ніж перейти до математичних форм цього аналізу, важливо згадати загальні припущення, що використовуються для дослідження цієї системи з декількома виходами. Перше основне припущення полягає в тому, що всі компоненти цієї системи працюють в умовах стаціонарного режиму. Друге припущення полягає в тому, що всі компоненти мають незначні теплові втрати, за винятком PEM-електролізера. Оскільки аналіз системи зосереджений на теплових та робочих процесах, доцільно припустити, що зміни кінетичної та потенційної енергій у компонентах системи є незначними порівняно з теплообміном, роботою та змінами ентальпії. Ще одне припущення, про яке слід згадати, полягає в тому, що втрати тиску в теплообмінниках та сполучних трубах є занадто малими, щоб їх враховувати в аналізі. Єдиним винятком є теплообмінники установки опріснення. Що стосується компресорів та насосів, то вони працюють в адіабатичних умовах.

Далі наводяться закони збереження маси та енергії для кожного компонента системи разом із відповідними припущеннями. Крім того, для кожного компонента представлено другий закон термодинаміки в термінах ентропії, щоб визначити швидкість утворення ентропії для основних компонентів системи, а також швидкості руйнування ексергії.

2.4.1 Компресор 1

Почнемо з того, що для компресора 1 рівняння балансу маси можна записати так:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2, \quad (2.1)$$

а рівняння балансу енергії має вигляд:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{14} = \dot{m}_2 h_2, \quad (2.2)$$

де \dot{W}_{14} – це частина електроенергії, що надходить від вітрогенераторів. Передбачається, що цей компресор працює з постійним ізоентропійним ККД 85 %.

Ізоентропічний ККД цього компресора математично виражається як:

$$\eta_{C1} = \frac{h_{2,s} - h_1}{h_2 - h_1}, \quad (2.3)$$

де $h_{2,s}$ – ентальпія, якщо компресор працював би в ідеальних умовах.

Іншим припущенням для цього компресора є те, що він є адіабатичним. Далі, рівняння балансу ентропії має вигляд:

$$\dot{m}_1 s_1 + \dot{S}_{gen,C1} = \dot{m}_2 s_2. \quad (2.4)$$

Знаючи швидкість генерації ентропії компресора 1 та еталонну температуру, можна визначити швидкість руйнування ексергії цього компонента за допомогою такого виразу:

$$\dot{E}x_{D,C1} = T_o \dot{S}_{gen,C1}. \quad (2.5)$$

2.4.2 Теплообмінник гарячої води

Після компресора 1 рідина надходить до теплообмінника гарячої води, і тут розглядаються рівняння термодинамічного балансу. Існує два рівняння балансу маси: одне для гарячої рідини, а інше — для холодної. Для гарячої рідини воно має вигляд:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 , \quad (2.6)$$

а для холодної рідини:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_5 . \quad (2.7)$$

Рівняння енергетичного балансу виражається наступним чином, якщо не враховувати теплові втрати теплообмінника [18-21]:

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 . \quad (2.8)$$

Крім того, рівняння ентروпійного балансу має вигляд:

$$\dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_7 s_7 + \dot{S}_{gen,HWHE} = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_5 s_5 , \quad (2.9)$$

де індекс HWHE означає теплообмінник гарячої води.

Для розрахунку швидкості руйнування ексергії використовуємо подібний вираз:

$$\dot{E}x_{D,HWHE} = T_o \dot{S}_{gen,HWHE} . \quad (2.10)$$

2.4.3 Розширювальні клапани

У досліджуваній системі є два розширювальних клапани, і обидва працюють в ізоентальпійних умовах, що означає, що ентальпія поточної рідини є постійною. Для EV1 баланс маси та баланс ентальпії виражаються відповідно як:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 , \quad (2.11)$$

та

$$h_3 = h_4 . \quad (2.12)$$

Для EV2 вони мають вигляд

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18}, \quad (2.13)$$

та

$$h_{17} = h_{18}. \quad (2.14)$$

2.4.4 Насос 1

Наступним компонентом, який буде моделюватися, є насос 1. Рівняння балансу маси має вигляд:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6, \quad (2.15)$$

а баланс енергії:

$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_{Pump1} = \dot{m}_6 h_6. \quad (3.16)$$

Потужність, що подається на цей насос, розраховується за допомогою моделі постійного питомого об'єму, яка описується так:

$$\dot{W}_{Pump1} = \frac{\dot{m}_5 v_5}{\eta_{Pump}} (P_6 - P_5), \quad (2.17)$$

де v_5 – питомий об'єм у одиницях $\text{м}^3 \text{кг}^{-1}$;

P – тиск у кПа;

η_{Pump} – ККД насоса, який приймається рівним 90%. Для цього насоса також можна провести аналіз за другим законом термодинаміки. Баланс ентропії має вигляд:

$$\dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{gen,Pump1} = \dot{m}_6 s_6, \quad (2.18)$$

а швидкість руйнування ексергії становить:

$$\dot{E}x_{D,Pump1} = T_o \dot{S}_{gen,Pump1}. \quad (2.19)$$

2.4.5 Теплообмінник «повітря-вода»

Останнім компонентом теплового насоса є теплообмінник «повітря-вода», скорочено АWHE, і його термодинамічне моделювання представлено

далі. Як і для попереднього теплообмінника, існують два рівняння балансу маси. Для гарячої рідини, якою є вода, воно має вигляд:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7, \quad (2.20)$$

а для холодної рідини, якою є повітря в приміщенні:

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_8. \quad (2.21)$$

Припустивши відсутність теплових втрат у цьому теплообміннику, рівняння енергетичного балансу набуває такого вигляду:

$$\dot{m}_0 h_0 + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8. \quad (2.22)$$

Рівняння балансу ентропії має вигляд:

$$\dot{m}_0 s_0 + \dot{m}_6 s_6 + \dot{S}_{gen,AWHE} = \dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_8 s_8. \quad (2.23)$$

Швидкість руйнування ексергії просто виражається як:

$$\dot{E}x_{D,AWHE} = T_o \dot{S}_{gen,AWHE}. \quad (2.24)$$

2.4.6 Компресор 2

Наступною підсистемою, яку розглянемо аналогічним чином, є підсистема опріснення. Першим компонентом цієї підсистеми є компресор 2. Морська вода засмоктується з моря з постійною та стабільною масовою витратою. Рівняння масового балансу має вигляд:

$$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{16} \quad (2.25)$$

а рівняння енергетичного балансу, яке передбачає споживання електроенергії від вітрогенераторів для нагрівання морської води, має вигляд:

$$\dot{m}_{19} h_{19} + \dot{W}_{15} = \dot{m}_{16} h_{16} \quad (2.26)$$

Припускається, що цей компресор працює з постійним ізоентропічним ККД 85 %. Ізоентропічний ККД цього компресора становить:

$$\eta_{C2} = \frac{h_{16,s} - h_{19}}{h_{16} - h_{19}} \quad (2.27)$$

Цей компресор має незначні теплові втрати. Після цього рівняння балансу ентропії має вигляд:

$$\dot{m}_{19}s_{19} + \dot{S}_{gen,C2} = \dot{m}_{16}s_{16} \quad (2.28)$$

Як і для попередніх компонентів:

$$\dot{E}x_{D,C2} = T_o \dot{S}_{gen,C2} \quad (2.29)$$

2.4.7 Насос 2

Наступним компонентом, що моделюється, є насос 2. Рівняння балансу маси має вигляд:

$$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{21} \quad (2.30)$$

а баланс енергії:

$$\dot{m}_{20}h_{20} + \dot{W}_{Pump2} = \dot{m}_{21}h_{21} \quad (2.31)$$

Потужність, що подається на цей насос, визначається за допомогою наступного виразу, де питомий об'єм рідини вважається постійним:

$$\dot{W}_{Pump2} = \frac{\dot{m}_{20}v_{20}}{\eta_{Pump}} (P_{21} - P_{20}) \quad (3.32)$$

Як і для насоса 1, η_{Pump} має значення 90%. Рівняння балансу ентропії має вигляд:

$$\dot{m}_{20}s_{20} + \dot{S}_{gen,Pump2} = \dot{m}_{21}s_{21} \quad (2.33)$$

а швидкість руйнування ексергії становить:

$$\dot{E}x_{D,Pump2} = T_o \dot{S}_{gen,Pump2} \quad (2.34)$$

2.4.8 Установа для опріснення

Тепер розглянемо термодинамічну модель установки для опріснення. Рівняння масового балансу гарячої рідини, яка подає тепло, має вигляд:

$$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17} \quad (2.35)$$

а потоки води, що проходять опріснення, мають рівняння масового балансу, яке виражається як:

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{23} + \dot{m}_{24} \quad (2.36)$$

Сукупний енергетичний баланс установки для опріснення води має вигляд:

$$\dot{m}_{16}h_{16} + \dot{m}_{21}h_{21} = \dot{m}_{17}h_{17} + \dot{m}_{23}h_{23} + \dot{m}_{24}h_{24} \quad (2.37)$$

Швидкість теплопередачі, що подається до цієї установки, обчислюється як різниця ентальпій гарячої рідини за формулою:

$$\dot{Q}_{Desalination} = \dot{m}_{16}(h_{16} - h_{17}) \quad (2.38)$$

Крім того, загальне рівняння ентропійного балансу має вигляд:

$$\dot{m}_{16}s_{16} + \dot{m}_{21}s_{21} + \dot{S}_{gen,Desalination} = \dot{m}_{17}s_{17} + \dot{m}_{23}s_{23} + \dot{m}_{24}s_{24} \quad (2.39)$$

Щоб визначити швидкість втрати ексергії для цього пристрою, використовуємо таке рівняння:

$$\dot{Ex}_{D,Desalination} = T_o \dot{S}_{gen,Desalination} \quad (2.40)$$

2.4.9 Насоси 3 і 4

Моделювання насосів 3 і 4 аналогічне моделюванню двох попередніх насосів, описаних раніше. Через насос 3 проходить потік опрісненої води. Рівняння балансу маси має вигляд:

$$\dot{m}_{24} = \dot{m}_{25} \quad (2.41)$$

а баланс енергії:

$$\dot{m}_{24}h_{24} + \dot{W}_{Pump3} = \dot{m}_{25}h_{25} \quad (2.42)$$

Потужність, що подається на цей насос, становить:

$$\dot{W}_{Pump3} = \frac{\dot{m}_{24}v_{24}}{\eta_{Pump}}(P_{25} - P_{24}) \quad (2.43)$$

Ентропійний баланс має вигляд:

$$\dot{m}_{24}s_{24} + \dot{S}_{gen,Pump3} = \dot{m}_{25}s_{25} \quad (2.44)$$

а швидкість руйнування ексергії становить:

$$\dot{Ex}_{D,Pump3} = T_o \dot{S}_{gen,Pump3} \quad (2.45)$$

Насос 4 має точні рівняння балансу, але вхідний потік змінюється зі стану 24 на стан 27, а стан на виході змінюється з 25 на 28. Оскільки вони є абсолютно однаковими, записувати тут модель насоса 4 є зайвим.

2.4.10 Електролізер PEM

Останнім компонентом у досліджуваній системі є електролізер PEM. Термодинамічна модель починається з рівняння масового балансу, яке має вигляд:

$$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29} + \dot{m}_{30} \quad (2.46)$$

Припускається, що електролізер працює в умовах стабільної температури та тиску. Споживання енергії можна визначити, знаючи ККД PEM, який припускається рівним 77%. Математичне визначення цього ККД описано так:

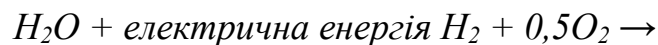
$$\eta_{PEM} = \frac{\dot{W}_{13}}{\dot{m}_{30} LHV_{H_2}} \quad (2.47)$$

де LHV_{H_2} – нижча теплота згоряння водню;

\dot{m}_{30} – швидкість виробництва водню. Теплові втрати, пов'язані з цим процесом, можна визначити за рівнянням енергетичного балансу, яке має вигляд:

$$\dot{m}_{28} h_{28} + \dot{W}_{13} = \dot{m}_{29} h_{29} + \dot{m}_{30} h_{30} + \dot{Q}_{PEM\ loss} \quad (2.48)$$

Загальне хімічне рівняння, що описує цей процес, має вигляд:



Аналіз другого закону термодинаміки для цього електролізера описується рівнянням балансу ентропії:

$$\dot{m}_{28} s_{28} + \dot{S}_{gen,PEM} = \dot{m}_{29} s_{29} + \dot{m}_{30} s_{30} + \frac{\dot{Q}_{PEM\ loss}}{T_0} \quad (2.49)$$

Знаючи швидкість утворення ентропії, швидкість руйнування ексергії становить:

$$\dot{E}x_{D,PEM} = T_o \dot{S}_{gen,PEM} \quad (2.50)$$

2.4.11 Загальна ефективність

Останньою частиною термодинамічного аналізу розглянутої системи є визначення загальних показників ефективності. Першим показником є коефіцієнт корисної дії (COP) теплового насоса з енергетичної точки зору. У цьому дослідженні він визначається як:

$$COP_{energy, heat pump} = \frac{\dot{m}_6 (h_6 - h_7)}{\dot{W}_{14} + \dot{W}_{Pump1}}, \quad (3.51)$$

$$COP_{energy, cascaded heat pump} = \frac{\dot{m}_6 (ex_6 - ex_7)}{\dot{W}_{14} + \dot{W}_{Pump1}}. \quad (3.52)$$

Тепер, для всієї системи, ефективність системи в енергетичному вираженні становить:

$$\eta_{energy, system} = \frac{\dot{W}_9 + \dot{m}_6 (h_6 - h_7) + \dot{m}_{26} h_{26} + \dot{m}_{30} LHV_{H2}}{\dot{W}_{10}}. \quad (3.53)$$

Тоді як форма ексергії має вигляд:

$$\eta_{energy, system} = \frac{\dot{W}_9 + \dot{m}_6 (ex_6 - ex_7) + \dot{m}_{26} ex_{26} + \dot{m}_{30} ex_{30}}{\dot{W}_{10}}. \quad (3.54)$$

Теплова навантаження будівлі розраховується за формулою:

$$BL_{ij} = \left(\frac{t_{zi} - t_j}{t_{zi} - t_{OD}} \right) C_z \cdot \dot{q}_{AFull}, \quad (3.55)$$

де t_j – температура зовнішнього повітря;

t_{zi} – температура при нульовому навантаженні;

t_{OD} – розрахункова температура зовнішнього повітря;

C_z – коефіцієнт нахилу;

\dot{q}_{AFull} – теплова потужність.

2.4.12 Витрати та викиди окремих видів енергії

Оскільки громада потребуватиме системи подачі прісної води незалежно від того, яке джерело енергії ми використовуємо, вартість системи буде

зосереджена лише на джерелі енергії та вітрогенераторі. У Нунавуті немає газопроводів; тому більшість опалення здійснюється за рахунок нафтопродуктів або електроенергії. Таблиця 2.2 містить вартість енергії.

Таблиця 2.2 – Вартість енергії (2025 р)

Джерело енергії	Одиниця	Вартість (\$)
Електроенергія	кВт·год	0,38
Опалення дизелем	л	1,08
Опалення бензином	л	1,07

Як показано в таблиці 2.3, було проаналізовано 5 найкращих турбін з урахуванням роботи в умовах низьких температур, і на основі ціни та продуктивності було обрано модель E70E4. Вартість вітрової турбіни E70E4, трансформатора, системи обігріву лопатей та транспортування від компанії Enercon у Монреалі до Нунавуту склала 4,2 млн доларів.

Таблиця 2.3 – Вітрогенератори для холодного клімату

Виробники	Siemens	Northern power	Enercon	Senvion	Nordex
Модель турбіни	SWT-2.3-101	NW100 Arctic	E70E4	3.2M114CCV	N117/3000
Потужність	2,3 МВт	100 кВт	2,3 МВт	3,2 МВт	3,0 МВт
Робоча температура	-25 °C	-40 °C	-40 °C	-30 °C	-30 °C
Функції протиобледеніння/розморожування	Система протиобледеніння	Гідрофобне полімерне покриття	Запобігання обмерзанню: подача гарячого повітря від початку лопаті до її краю	Захист від обмерзання та розморожування	Система протиобледеніння нагріває плечі лопатей
Загальна вартість (млн дол.)	4,5	4,3	4,2	4,3	4,2

Як показано в таблиці 2.4, хоча вітроенергетика є відновлюваним джерелом енергії [22-25], вона все ж викидає певну кількість CO₂. Однак у порівнянні з гідроелектроенергією [26,27] вона викидає найменшу кількість

еквіваленту викидів CO₂ на кг. Ця кількість перевищує показники сонячної енергетики [28,29].

У порівнянні з енергетичними ресурсами на основі викопного палива, такими як природний газ, дизельне паливо та бензин, вона викидає значно менше.

Таблиця 2.4 – Порівняння викидів еквіваленту CO₂ між джерелами енергії

Ресурс	Викиди еквіваленту CO ₂ (кг)
Природний газ	0,525
Гідроелектроенергія	0
Атомна енергія	1,5 x 10 ⁻⁴
Вітроенергія	7,4 x 10 ⁻⁴
Сонячна енергія	6,15 x 10 ⁻³
Дизельне паливо	2,69
Бензин	2,35

2.5 Висновки до розділу

1. Аналіз кліматичних умов показав, що середньомісячна швидкість вітру становить 5,6–6,7 м/с, що перевищує швидкість запуску більшості сучасних вітрогенераторів (3 м/с) і створює сприятливі передумови для ефективної роботи вітроенергетичної установки.

2. Визначено енергетичні потреби об'єкта: шестиповерховий житловий комплекс на 60 квартир потребує мінімальної електричної потужності 280 кВт та теплової потужності 460 кВт. Добова потреба в опрісненій воді для громади становить 18 м³. Внутрішні теплонадходження від побутової техніки та мешканців враховано при розрахунку теплового балансу будівлі.

3. Запропоновано багатофункціональну систему енергопостачання, яка інтегрує вітрогенератор, тепловий насос з морською водою як джерелом низькопотенційного тепла, багатоефектну установку опріснення та підсистему хімічного накопичення енергії на базі PEM-електролізера та паливних

елементів. Система одночасно виробляє чотири види енергоресурсів: електроенергію, тепло для опалення, прісну воду та водень як резервне паливо.

4. Описано детальну термодинамічну модель системи, що включає рівняння балансу маси, енергії, ентропії та ексергії для всіх ключових компонентів: двох компресорів, теплообмінників, розширювальних клапанів, насосів, установки опріснення та PEM-електролізера.

5. Проведено порівняльний аналіз вартості та екологічності енергоджерел. Вибрано вітрову турбіну Enercon E70E4 (2,3 МВт) з системою протиобмерзання за критерієм оптимального співвідношення ціни та продуктивності (4,2 млн дол.).

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Аналіз результатів розрахунків

В результаті термодинамічного моделювання системи, за моделями описаними в розділі 2, були отримані точки стану, наведені в таблиці 3.1. Масова витрата холодоагенту R134a, що використовується в першому циклі теплового насоса, становить 3,127 кг/с, тоді як витрата води більш ніж утричі перевищує це значення і становить 11,25 кг/с. Така вища масова витрата води необхідна для поглинання великої кількості теплової енергії, що передається холодоагентом, який надходить із морської води та компресора 1. Така ж залежність спостерігається в установці опріснення, де морська вода, що надходить, поглинає тепло від потоку холодоагенту під високим тиском і високою температурою, що називається станом 16. Це тепло допомагає очистити морську воду для отримання прісної води для побутового використання та PEM-електролізера. Співвідношення виробленої прісної води (стан 24) (рис. 2.3) до морської води, що надходить (стан 21) в установці для опріснення становить 9,6 %, що є прийнятним для типових багатоефективних установок для опріснення. Решта морської води скидається назад у море у вигляді розсолу. Потужність, що споживається компресорами, також можна розрахувати за цією таблицею. Для компресора 1 споживана потужність становить 98,2 кВт, а для компресора 2 – 13,7 кВт. Однією з переваг необхідності менших масових витрат холодоагенту є зниження енергетичних потреб інтегрованої системи, які забезпечуються вітрогенераторами. Значення ККД енергії та ексергії теплового насоса становлять 5,08 та 0,71, відповідно. Також загальна енергетична та ексергійна ефективність всієї системи становлять 1,39 та 0,402 відповідно.

Таблиця 3.1 – Точки термодинамічного стану системи на основі вітрогенератора

Номер стану	Рідини	Температура (°C)	Тиск (кПа)	Питома ентальпія (кДж/кг ⁻¹)	Питома ентропія (кДж/кг ⁻¹ ·K ⁻¹)	Питома ексергія (кДж/кг ⁻¹)	Масовий витрата (кг ^{s⁻¹})
0	R134A	10	101,325	263,8	1,062	Н/Д	Н/Д
0	Вода	10	101,325	42,12	8,151	Н/Д	Н/Д
1	R134A	10	414,9	156,2	0,9264	30,65	3,127
2	R134A	60	1511	287,6	0,9405	58,12	3,127
3	R134A	60	1683	139,4	0,4892	37,58	3,127
4	R134A	10	414,9	64,43	0,2529	30,53	3,127
5	Вода	60	300	251,4	0,8311	303,5	11,25
6	Вода	60,03	1000	251,6	0,831	17,55	11,25
7	Вода	50	1000	230,7	2,12	11,69	11,25
8	Вода	22	2,645	2541	8,622	101,8	Н/Д
16	R134A	90	2757	301,6	0,9551	70,77	0,3021
17	R134A	10	414,9	65,43	0,2529	30,53	0,3021
18	R134A	10	414,9	65,43	0,2529	30,53	0,3021
19	R134A	10	414,9	256,2	0,9264	30,65	0,3021
20	Сіль	10	550	44,65	Н/Д	Н/Д	2,55
21	Вода	62,61	550	262,6	Н/Д	Н/Д	2,55
22	Сіль	70	350	291,2	Н/Д	Н/Д	2,298
23	Сіль	70	550	291,4	Н/Д	Н/Д	2,298
24	Вода	70	350	293,3	0,9549	23,71	0,2448
25	Вода	70	550	293,5	0,955	23,92	0,2448
27	Вода	60	101,3	293,3	0,9549	23,71	0,2448
28	Вода	60	550	293,3	0,9558	23,97	0,2448
31	Сіль	10	101,3	42,74	Н/Д	Н/Д	2,55
32	Сіль	20	350	84,28	Н/Д	Н/Д	2,298

Друга частина цієї роботи з термодинамічного моделювання інтегрованої системи – аналіз ексергії. Цей аналіз порівнює показники втрати ексергії різних компонентів системи, щоб визначити місця для можливих поліпшень. З таблиці

3.2 видно, що найвищий показник втрати ексергії спостерігається у резервуарі для прісної води – 286,6 кВт. Це значення значно перевищує показники втрати ексергії всіх інших компонентів системи, оскільки резервуар віддає тепло в атмосферу, що не є корисною енергією для системи. Другим і третім компонентами за показниками втрати ексергії є компресор 1 і компресор 2, з показниками 12,46 кВт та 1,594 кВт відповідно. Насоси мають на порядки нижчі показники втрати ексергії, ніж компресори, що означає, що насоси є більш ексергетично ефективними. Одним із способів підвищення загальної ефективності цієї системи є використання холодоагентів, які можуть переносити більше теплової енергії на один кілограм холодоагенту порівняно з водою. Це знизить масову витрату холодоагентів, необхідну для подачі тієї ж кількості тепла до системи, що лінійно знизить показники втрати ексергії компресорів відповідно до згаданої раніше моделі ексергії цієї системи, згаданої раніше.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти втрат ексергії компонентів багатовихідної системи на основі вітрогенератора

Компонент	Коефіцієнт втрат ексергії (кВт)
Компресор 1	12,46
Компресор 2	1,594
Резервуар для прісної води	286,6
Насос 1	0,01403
Насос 3	0,002261
Насос 4	0,9564

3.2 Теплове навантаження населеного пункту

Перше параметричне дослідження, представлене в цьому розділі, стосується теплового навантаження населеного пункту у згаданому раніше місці, як показано на рисунку 3.1.

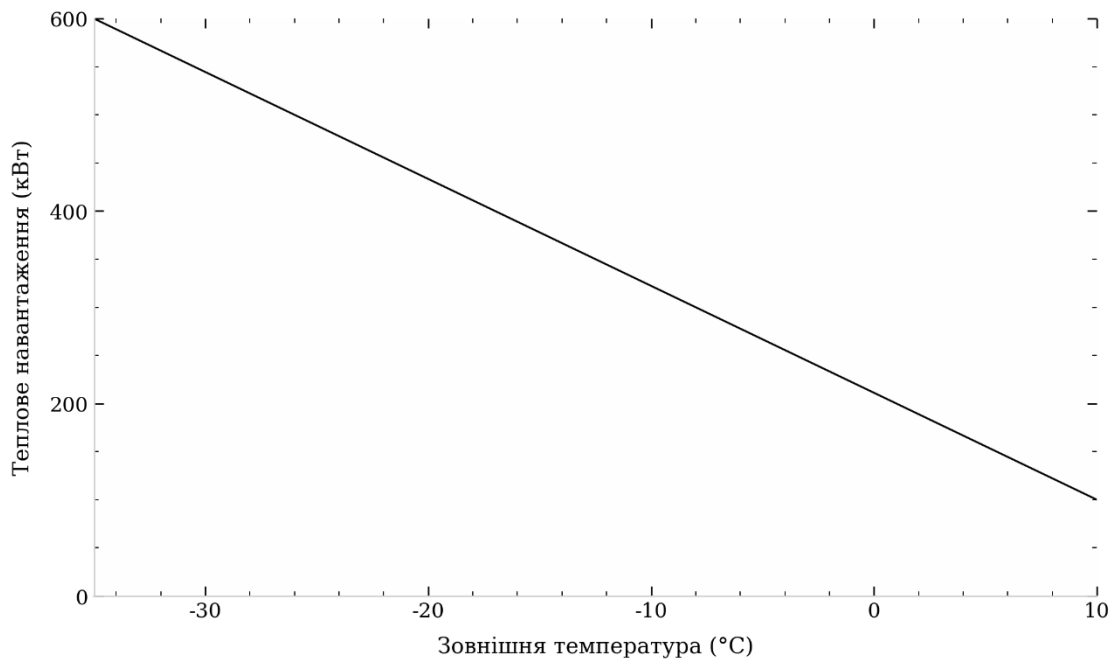


Рисунок 3.1 – Теплова потужність громади у вибраному місці як функція температури зовнішнього повітря

Теплове навантаження змінюється лінійно зі зміною температури зовнішнього повітря. Як і очікувалося, теплове навантаження лінійно знижується з 600 кВт до 90 кВт при підвищенні температури зовнішнього повітря з -32 до 10 °C. Оскільки обране місто розташоване на півночі Канади, потреба в опаленні приміщень буде існувати протягом усього року. Далі на рисунку 3.2 показано необхідну потужність вітрогенератора для забезпечення достатнього опалення в залежності від температури зовнішнього повітря. У кривій спостерігається певна нелінійність при підвищенні температури від -32 до 10 °C. Очевидно, що потужність вітрогенератора зменшується при підвищенні температури зовнішнього повітря, і це безпосередньо пов'язано з тим, що потреби громади в опаленні зменшуються. Це свідчить про те, що опалення приміщень є основним та рушійним елементом цієї інтегрованої системи. Це узгоджується з результатами, обговореними раніше, щодо коефіцієнта втрат ексергії компресора 1. Ще одним висновком, який можна зробити при порівнянні теплового навантаження та необхідної потужності вітрогенератора, є те, що значення обох показників близькі одне до одного на кожному рівні температури. Для ілюстрації: коли температура зовнішнього

повітря становить $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$, теплова потужність становить 600 кВт, а необхідна потужність лише трохи вища — 750 кВт. Це вказує на те, що ця інтегрована система постачає тепло громаді з помітною та стабільною ефективністю в широкому діапазоні температур.

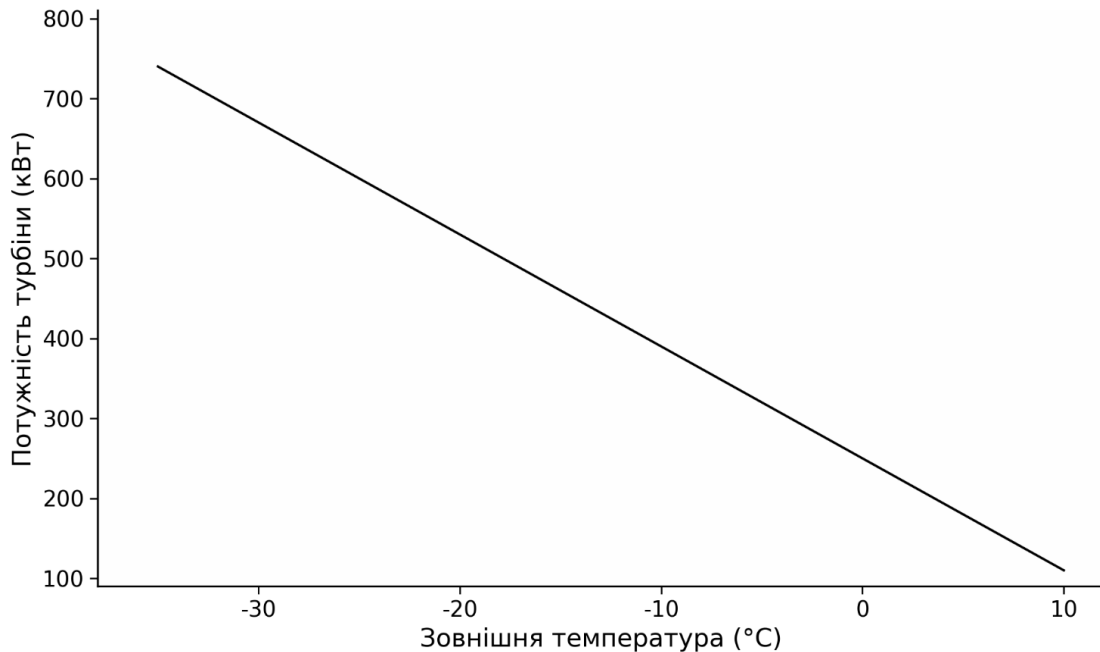


Рисунок 3.2 – Необхідна потужність турбіни як функція температури зовнішнього повітря

На рисунку 3.3 представлено порівняння теплового насоса даної системи та типового повітряного теплового насоса з точки зору енергетичного коефіцієнта корисної дії (COP). Як чітко показано, між цими двома системами опалення існує значна різниця при підвищенні температури від екстремально низьких рівнів до помірної температури зовнішнього повітря. Тут чітко видно перевагу використання теплового насоса в запропонованій системі, оскільки тепло забирається зі стабільного джерела, яким є море, при постійній температурі $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стабільність температури моря протягом сезонів підтримує коефіцієнт корисної дії (COP) теплового насоса в запропонованій системі на постійному та стабільному рівні 5,08. З іншого боку, продуктивність повітряного теплового насоса значною мірою залежить від температури зовнішнього повітря, оскільки він використовує навколишнє повітря як джерело вхідного тепла. Вплив температури зовнішнього повітря є значним, і

коефіцієнт корисної дії (COP) змінюється від 2,6 до 5,08 у міру підвищення температури.

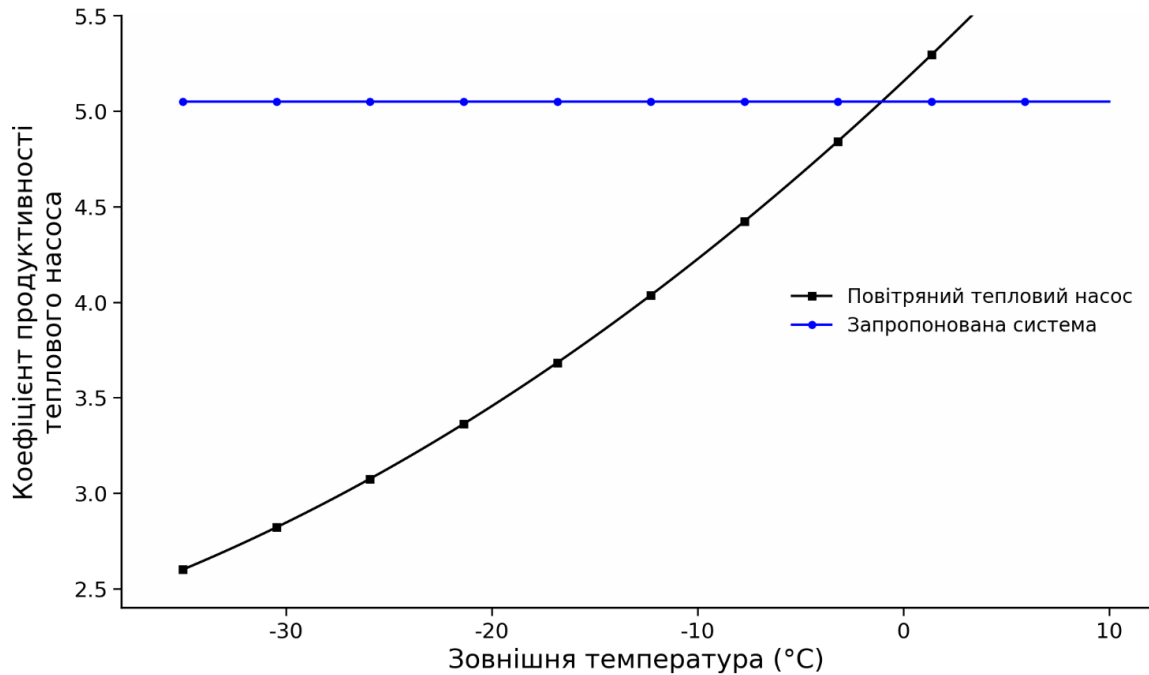


Рисунок 3.3 – Енергетичний ККД запропонованої системи та енергетичний ККД типового повітряного теплового насоса як функції температури зовнішнього повітря

Те саме порівняння між цими двома тепловими насосами, але тепер з точки зору коефіцієнта корисної дії (COP) за екзергією, зображено на рисунку 3.4. Як і передбачалося, коефіцієнт корисної дії (COP) за екзергією запропонованої системи залишається постійним з тієї ж причини, а саме завдяки стабільності температури моря, яке є джерелом тепла для запропонованої системи. Це значення становить 0,71. Однак коефіцієнт корисної дії (COP) за екзергією повітряного теплового насоса швидко змінюється від мінімального значення 0,36 до того ж значення, що й у запропонованій системі, – 0,71. Це пояснюється тим, що обидва джерела тепла, а саме море та повітря, мають однакову температуру. Знову ж таки, перевага використання запропонованої системи з точки зору постачання тепла з постійною продуктивністю в широкому діапазоні температурних рівнів демонструється з точки зору ексергії.

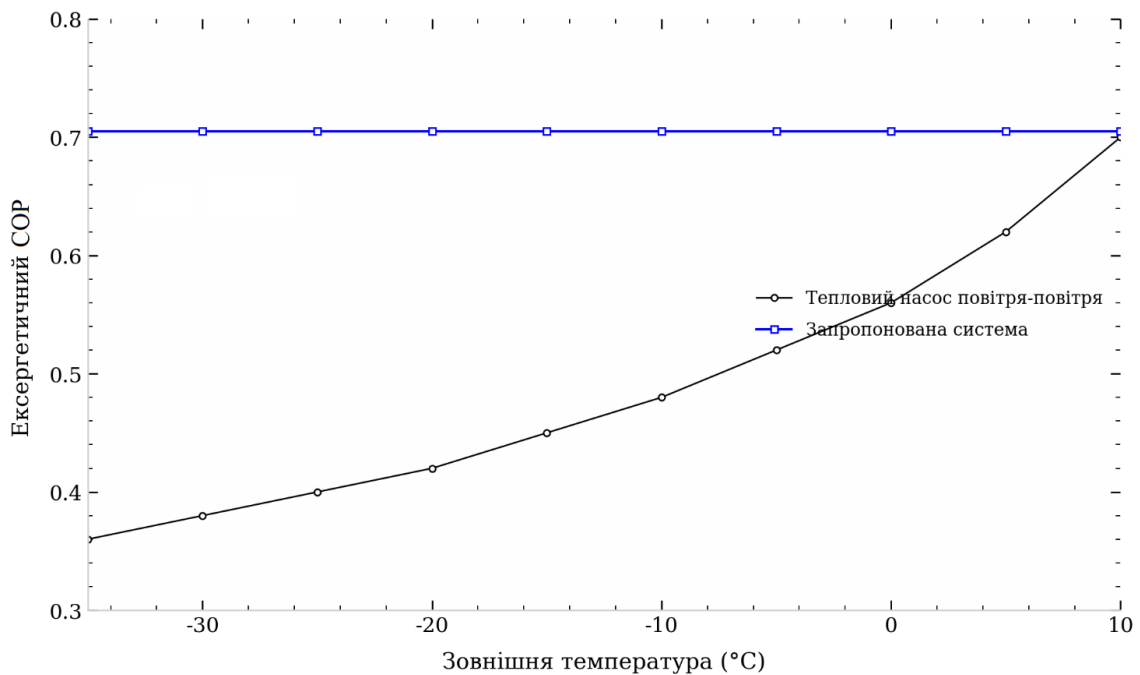


Рисунок 3.4 – Ексергетичний ККД запропонованої системи та ексергетичний ККД типового повітряного теплового насоса як функції температури зовнішнього повітря

3.3 Загальна енергетична та ексергетична ефективність системи

Далі важливо порівняти загальну енергетичну ефективність запропонованої системи з типовим повітряним тепловим насосом [30]. На рисунку 3.5 показано, що загальна енергетична ефективність системи має постійне значення близько 1,39, тоді як загальна енергетична ефективність повітряного теплового насоса різко коливається від 1,18 до 1,39 у міру підвищення температури джерела тепла, яким є повітря. Основною причиною того, що ці значення перевищують одиницю, є те, що теплові насоси є основною підсистемою обох систем у порівнянні. Теплові насоси за своєю природою мають значення, вищі за одиницю. Цікаво відзначити, що загальна енергоефективність запропонованої системи майже в 6 разів нижча за її енергетичний коефіцієнт корисної дії (COP), і це пов'язано з недоліками інших компонентів інтегрованої системи, таких як установка опріснення та РЕМ-

електролізер, які виробляють прісну воду та водень відповідно з низькою ефективністю.

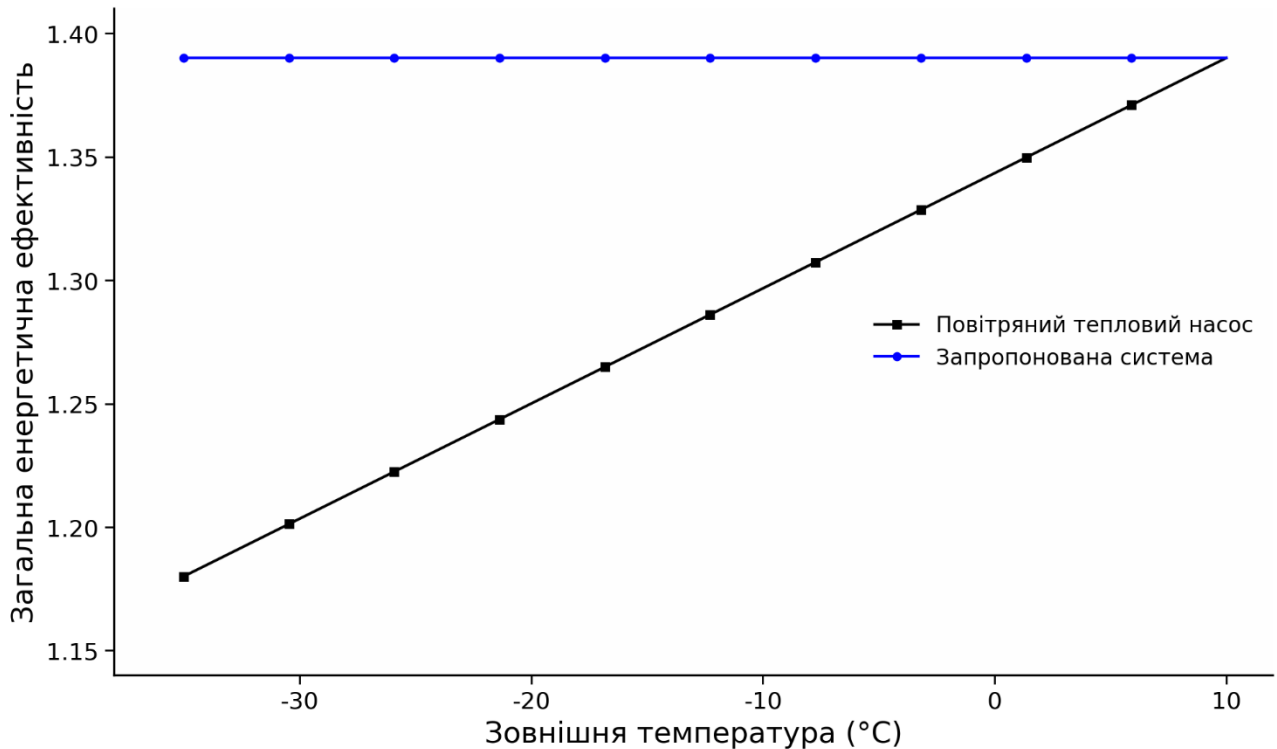


Рисунок 3.5 – Загальна енергоефективність запропонованої системи та загальна енергоефективність типового повітряного теплового насоса як функції температури зовнішнього повітря

3.4 Вартість енергії

Річну реальну процентну ставку, термін експлуатації проекту та основний капітал системи можна визначити за допомогою RETScreen. Як результат, усі розрахунки вартості базувалися на сучасних ставках за період у 20 років. Це фіксовані витрати, які виникають незалежно від розміру системи, архітектури або джерела енергії. Ці характеристики впливатимуть на загальну чисту поточну вартість кожної системи, але на однакову суму. Як наслідок, вони не мають впливу на різницю у вартості систем. Оцінки в цій роботі були розроблені з використанням вітрогенератора Enercon E70 потужністю 2,3 МВт. Цей вітрогенератор оснащений технологією підігріву лопатей. Орієнтовна вартість вітрогенератора та його встановлення становить 4,3 млн доларів. У

таблиці 3.3 наведено оцінку вартості опалення за допомогою вітрогенератора.

Таблиця 3.3 – Оцінка витрат на опалення за допомогою вітрогенератора

Місяць	Середня температура повітря (°C)	Щомісячна потужність опалення (МВт)	Потужність вітроенергетики (МВт)
Січень	-32	460,3	90,3
Лютий	-33	424,0	83,1
Березень	-31,2	453,0	88,8
Квітень	-23,5	370,2	72,6
Травень	-11	268,3	52,6
Червень	-0,6	167,6	32,8
Липень	4	131,1	25,7
Серпень	1,9	150,3	29,4
Вересень	-5	206,4	40,4
Жовтень	-15,2	306,7	60,1
Листопад	-24,3	377,3	74,0
Грудень	-29	432,9	84,9

Оскільки вітроенергетичний ресурс є безкоштовним, енергетична вартість використання вітрогенератора дорівнює нулю. У таблиці 3.4 наведено вартість опалення електроенергією протягом року. Незважаючи на те, що температура в лютому нижча, вартість опалення електроенергією вища в січні, оскільки січень має більше днів. У таблиці 3.5 наведено вартість опалення бензином протягом року. Бензин є найдорожчим видом опалення в Нунавуті. У таблиці 3.6 наведено вартість опалення дизелем протягом року. Найнижча вартість опалення припадає на липень. Термін експлуатації більшості вітрогенераторів становить 20 років.

Таблиця 3.4 – Оцінка витрат на опалення електроенергією

Місяць	Середня температура повітря (°C)	Щомісячна потужність опалення (МВт)	Потужність вітроенергетики (МВт)	Вартість електроенергії (\$)
Січень	-32	460,3	90,3	34 299
Лютий	-33	424,0	83,1	31 595
Березень	-31,2	453,0	88,8	33 754
Квітень	-23,5	370,2	72,6	27 587
Травень	-11	268,3	52,6	19 988
Червень	-0,6	167,6	32,9	12 484
Липень	4	131,1	25,7	9 766
Серпень	1,9	150,3	29,4	11 197
Вересень	-5	206,4	40,4	15 386
Жовтень	-15,2	306,7	60,1	22 850
Листопад	-24,3	377,3	74,0	28 114
Грудень	-29	432,9	84,9	32 254

Розрахунки базуються на тарифах на електроенергію, бензин та дизель. Орієнтовна вартість опалення громади за допомогою електроенергії становить 5,5 млн доларів, тоді як вартість опалення бензином та дизельним паливом становить 13,94 млн та 12,31 млн доларів відповідно. Оскільки вітер є безкоштовним, енергія, яку виробляє вітрогенератор, також буде безкоштовною. Використання вітрогенератора для роботи всієї системи обійдеться дешевше, ніж використання електроенергії, бензину та дизельного палива для опалення громади, як показано в таблиці 3.7.

Таблиця 3.5 – Оцінка витрат на опалення бензином

Місяць	Середня температура повітря (°C)	Щомісячна потужність опалення (МВт)	Бензин (кл)	Вартість бензину (\$)
Січень	-32	460,3	79,6	85 660
Лютий	-33	424,0	73,3	78 907
Березень	-31,2	453,0	78,3	84 298
Квітень	-23,5	370,2	64,0	68 897
Травень	-11	268,3	46,4	49 919
Червень	-0,6	167,6	29,0	31 179
Липень	4	131,1	22,7	24 389
Серпень	1,9	150,3	26,0	27 963
Вересень	-5	206,4	35,7	38 426
Жовтень	-15,2	306,7	530,1	57 067
Листопад	-24,3	377,3	65,2	70 214
Грудень	-29	432,9	74,8	80 554

Таблиця 3.6 – Оцінка витрат на опалення дизельним паливом

Місяць	Середня температура повітря (°C)	Щомісячна потужність опалення (МВт)	Дизельне паливо (кл)	Вартість дизельного палива (\$)
Січень	-32	460,3	70,0	75 645
Лютий	-33	424,0	64,5	69 682
Березень	-31,2	453,0	68,9	74 443
Квітень	-23,5	370,2	56,3	60 842
Травень	-11	268,3	40,8	44 083
Червень	-0,6	167,6	25,4	27 534
Липень	4	131,1	19,9	21 538
Серпень	1,9	150,3	22,9	24 694

Вересень	-5	206,4	31,4	33 934
Жовтень	-15,2	306,7	46,7	50 395
Листопад	-24,3	377,3	57,4	62 006
Грудень	-29	432,9	65,9	71 136

Таблиця 3.7 – Оцінка витрат на опалення за 20 років

Ресурси	Витрати (млн дол.)
Вітрогенератор	4,3
Електроенергія	5,58
Бензин	13,94
Дизельне паливо	12,31

3.5 Висновки до розділу

1. В результаті термодинамічного моделювання визначено точки стану всіх робочих тіл системи. Встановлено, що масова витрата холодоагенту R134a в циклі теплового насоса становить 3,127 кг/с, тоді як витрата води - 11,25 кг/с. Енергетичний коефіцієнт корисної дії (COP) теплового насоса досягає 5,08, а ексергетичний - 0,71. Загальна енергетична ефективність системи становить 1,39, а ексергетична - 0,402.

2. Проведено ексергетичний аналіз усіх компонентів системи. Встановлено, що найвищі втрати ексергії спостерігаються в резервуарі прісної води, що пояснюється тепловіддачею в атмосферу. Насоси демонструють на порядок нижчі показники втрат ексергії, що свідчить про їх високу ексергетичну ефективність.

3. Параметричне дослідження теплового навантаження показало його лінійну залежність від температури зовнішнього повітря: від 600 кВт при -32 °С до 90 кВт при 10 °С. Необхідна потужність вітрогенератора варіюється в діапазоні 750-120 кВт, що свідчить про стабільну ефективність системи в

широкому діапазоні кліматичних умов. Потреба в опаленні існує протягом усього року, що обумовлене суворим холодним кліматом регіону.

4. Порівняльний аналіз із типовим повітряним тепловим насосом виявив істотні переваги запропонованої системи. Коефіцієнт корисної дії теплового насоса з морською водою як джерелом тепла залишається стабільним на рівні 5,08 незалежно від температури повітря, тоді як COP повітряного теплового насоса коливається в діапазоні 2,6-5,08. Ексергетичний COP запропонованої системи також стабільний (0,71) порівняно з повітряним аналогом (0,36–0,71). Це підтверджує доцільність використання морської води як стабільного джерела низькопотенційного тепла в холодних умовах.

5. Загальна енергетична ефективність запропонованої системи має постійне значення 1,39, тоді як ефективність повітряного теплового насоса різко коливається від 1,18 до 1,39. Це свідчить про перевагу інтегрованої системи з точки зору постачання тепла зі стабільною продуктивністю в широкому діапазоні температур.

6. Економічний аналіз на 20-річний період експлуатації продемонстрував суттєву перевагу вітроенергетичного енергопостачання. Капітальні витрати на вітрогенератор Enercon E70 потужністю 2,3 МВт становлять 4,3 млн доларів, що є найнижчим показником серед усіх розглянутих варіантів. Вартість опалення електроенергією становить 5,58 млн доларів, дизельним паливом - 12,31 млн доларів, бензином - 13,94 млн доларів. Використання вітрогенератора дозволяє повністю виключити витрати на паливо, оскільки вітер є безкоштовним поновлюваним джерелом енергії. Таким чином, сумарні витрати на опалення за допомогою вітрогенератора на 23 % нижчі порівняно з електроенергією та в 3,2 рази нижчі порівняно з бензином.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Основні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації технологічного обладнання

Загальні вимоги безпеки до конструкції виробничого обладнання встановлені ДНАОП.

Безпека виробничого обладнання забезпечується [31]:

- при проектуванні – дотриманням принципів технологічності і ергономічності конструкції, застосуванням раціональних кінематичних схем, принципу безперервності процесу, дистанційного або автоматичного управління, забезпеченням запобіжними та захисними системами;
- при виготовленні – застосуванням сучасних технологій машинобудування, дотриманням передбачених допусків та посадок;
- при збірці та монтажі – точним дотриманням технології;
- при експлуатації – своєчасним обслуговуванням та профілактичними оглядами, дотриманням експлуатації, тощо.

Виробниче обладнання має бути пожежо- і вибухобезпечним. Воно не повинно створювати небезпеки в результаті дії вологості, сонячної радіації, механічних коливань, високих і низьких тисків і температур, агресивних речовин і мікроорганізмів.

Важливою умовою безпечної експлуатації обладнання є дотримання вимог санітарних норм і правил, галузевих стандартів і правил техніки безпеки щодо розмірів виробничих приміщень, галерей і тунелів, мінімальної висоти до низу виступаючих будівельних конструкцій, ширини проходів.

Рухомі частини обладнання, що є джерелом небезпеки, повинні бути огорожені, за виключенням частин, огороження яких не допускається за їх функціональним призначенням. У цих випадках передбачається сигналізація, що попереджує про пуск машин в роботу, засоби зупинки і відключення джерел енергії. При наявності машин значної довжини (наприклад, транспортерів)

засоби зупинки повинні розміщуватись не рідше як через кожні 10 м їх довжини.

Елементи конструкцій виробничого обладнання не повинні мати гострих кутів, кромок і поверхонь з нерівностями, що становлять собою джерело небезпеки, якщо їх наявність не визначається функціональним призначенням обладнання.

Конструкція обладнання повинна виключати можливість випадкового дотику працюючих до гарячих і переохолоджених частин. Виділення і поглинання обладнанням тепла, а також виділення їм вологи у виробничих приміщеннях не повинно перевищувати гранично допустимі! рівні (концентрації) в межах робочої зони.

4.2 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання

Для попередження про небезпеку застосовують звукові, світлові і кольорові сигнали. Сигнальні пристрої встановлюються в зонах видимості і слухового відчуття обслуговуючого персоналу. Сигнали небезпеки повинні чітко сприйматися у виробничій обстановці [31].

Нормативами визначаються сигнальні і розпізнавальні кольори. Основними сигнальними кольорами є червоний – забороняючий, засвідчуючий про безпосередню небезпеку, жовтий – зосереджуючий увагу і попереджуючий про можливу небезпеку і зелений – означаючий безпеку.

Розпізнавальними кольорами вважають зелений, червоний, синій, жовтий оранжевий, фіолетовий, коричневий, сірий.

Розпізнавальні кольори наносять на технологічне підйом-но-транспортне обладнання, трубопроводи, елементи будівельних конструкцій та інші споруди.

Сигнально-попереджувальним фарбуванням (жовтими і чорними смугами) відмічаються елементи будівельних конструкцій і міжцехового транспорту. Так, жовто-чорною смугою позначаються низькі балки, виступи і перепади у площині підлоги, краю люків і колодязів, кабіни і перила кранів,

вантажні гаки, бічні поверхні електрокарів, навантажувачів, візків, стріл автокранів.

4.3 Особливості проведення рятувальних та інших невідкладних робіт при ліквідації наслідків великих виробничих аварій і катастроф

Кожна конкретна аварія викликається сукупністю ряду причин і несприятливих факторів. Аналіз показує, що аварії виникають, головним чином, у результаті слабкої навченості персоналу, допущеної недбалості, порушенні технологічного процесу виробництва і правил техніки безпеки. Вивчення причин аварій і всебічна оцінка ступеня небезпеки дозволяють правильно визначити заходи щодо їх попередження, передбачити необхідні заходи захисту людей і зниження збитків.

Основними заходами щодо ліквідації наслідків великих аварій є: оповіщення про небезпеку робітників та службовців, формувань ЦО і населення, що проживає поблизу об'єкта; комплексна розвідка об'єкта, на якому відбулася аварія; порятунок людей з-під завалів, зі зруйнованих і пошкоджених будинків та споруд, надання медичної допомоги постраждалим і евакуація їх у лікувальні установи; гасіння пожеж; локалізація аварій на комунально-енергетичних мережах, які перешкоджають веденню рятувальних робіт; улаштування проїздів і проходів до місць аварій; обвалування нестійких конструкцій, розбирання завалів, демонтаж збереженого устаткування, якому загрожує небезпека; організація комендантської служби.

Швидке проведення рятувальних робіт і оперативна ліквідація наслідків аварії вимагають значних сил і засобів, для цих цілей залучаються спеціальні (об'єктові) і територіальні формування загального призначення і служб.

При ліквідації наслідків виробничих аварій застосовуються інженерна й інша спеціальна техніка: крани, бульдозери, екскаватори, компресорні станції, самоскиди. Важкі тягачі з тросами для розтягування і розведення великих

залізобетонних конструкцій, вертольоти великої вантажопідйомності і металорізальні установки.

Використовуються також засоби малої механізації: домкрати, лебідки, мотопили, газорізи, електронасоси й ін.

Рятувальні роботи в місцях аварії, як правило, проводяться в умовах загазованості, а при пожежах задимленості і високих температур; щоб забезпечити безперервність роботи з наростаючим темпом, сили ЦО поділяють на зміни і виділяють резерви.

У залежності від характеру і масштабу аварії керівництво ліквідацією наслідків здійснює або керівник даного підприємства, який є одночасно і начальником ЦО, або голова спеціально створюваної надзвичайної комісії. На кожну ділянку призначається керівник з числа відповідальних посадових осіб об'єкта або керівників ЦО і фахівців служб ЦО. Він повинен поставити завдання формуванням, вказати терміни і способи їх виконання, визначити порядок матеріального, технічного й інших видів забезпечення, організувати роботи, своєчасну зміну, відпочинок і харчування особового складу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналітичний огляд сучасних методів опалення приміщень у холодних регіонах. Встановлено, що будівельний сектор споживає близько 30 % світової енергії та 47 % енергії на опалення.

2. Проаналізовано технології накопичення теплової енергії та конфігурації теплових насосів з електричним і механічним приводом.

3. Встановлено, що прямі вітроенергетичні системи з механічним приводом та тепловим насосом є недостатньо вивченими, незважаючи на їхню перевагу у вигляді вищої ефективності перетворення енергії.

4. Розроблено багатофункціональну систему енергопостачання на базі вітрогенератора, що об'єднує тепловий насос з морською водою як джерелом низькопотенційного тепла, багатоефектну установку опріснення води та підсистему хімічного накопичення енергії на базі PEM-електролізера та паливних елементів. Система одночасно виробляє чотири види енергоресурсів: електроенергію, тепло для опалення, прісну воду та водень як резервне паливо.

5. Побудовано детальну термодинамічну модель системи, що включає рівняння балансу маси, енергії, ентропії та ексергії для всіх ключових компонентів. Енергетичний коефіцієнт корисної дії (COP) теплового насоса досягає 5,08, ексергетичний COP — 0,71. Загальна енергетична ефективність системи становить 1,39, а ексергетична — 0,402.

6. Проведено ексергетичний аналіз усіх компонентів системи. Встановлено, що найвищі втрати ексергії спостерігаються в резервуарі прісної води через тепловіддачу в атмосферу, тоді як насоси демонструють на порядок нижчі показники втрат. Необхідна потужність вітрогенератора варіюється в діапазоні 750–120 кВт, що свідчить про стабільну ефективність системи в широкому діапазоні температур.

7. Порівняльний аналіз із типовим повітряним тепловим насосом підтвердив суттєві переваги запропонованої системи. COP теплового насоса з морською водою залишається стабільним на рівні 5,08 незалежно від

температури повітря, тоді як COP повітряного теплового насоса коливається в діапазоні 2,6–5,08. Загальна енергоефективність запропонованої системи має постійне значення 1,39 порівняно з коливаннями від 1,18 до 1,39 у повітряного аналога. Це обумовлено стабільністю температури морської води (10 °C) як джерела низькопотенційного тепла.

8. Проведено техніко-економічний аналіз на 20-річний період експлуатації. Капітальні витрати на вітрогенератор Enercon E70 потужністю 2,3 МВт становлять 4,3 млн доларів США, що є найнижчим показником серед усіх розглянутих варіантів. Вартість опалення електроенергією — 5,58 млн доларів, дизельним паливом — 12,31 млн доларів, бензином — 13,94 млн доларів. Використання вітрогенератора дозволяє зменшити сумарні витрати на 23 % порівняно з електроенергією та в 3,2 рази порівняно з бензином.

9. Таким чином, запропонована система «вітрогенератор-тепловий насос» є технічно доцільною та економічно ефективною альтернативою традиційним джерелам енергії для тепlopостачання в умовах холодної кліматичної зони.

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. Zhang, Q., Zhang, X., Sun, D., & Wang, G. (2019). Municipal space heating using a ground source absorption heat pump driven by an urban heating system. *Geothermics*, 78, 224-232.
3. Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., & Ochifuji, K. (2007). Field performance of an energy pile system for space heating. *Energy and buildings*, 39(5), 517-524.
4. Pater, S. (2019). Field measurements and energy performance analysis of renewable energy source devices in a heating and cooling system in a residential building in southern Poland. *Energy and Buildings*, 199, 115-125.
5. Zhang, P., Wang, B., Wu, W., Shi, W., & Li, X. (2015). Heat recovery from Internet data centers for space heating based on an integrated air conditioner with thermosyphon. *Renewable energy*, 80, 396-406.
6. Ma, J., Fung, A. S., Brands, M., Juan, N., & Moyeed, O. M. A. (2020). Performance analysis of indirect-expansion solar assisted heat pump using CO₂ as refrigerant for space heating in cold climate. *Solar Energy*, 208, 195-205.
7. Addo-Binney, B., Besada, W., & Agelin-Chaab, M. (2022). Analysis of an integrated thermal energy system for applications in cold regions. *Journal of Energy Resources Technology*, 144(1), 012104.
8. Білоус П.В. Енергоефективність генерування тепла та електроенергії на міні-тес //П.В. Білоус, 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. – 105-106 с.

9. Керя Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керя, 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.

10. Abdin, Z., & Khalilpour, K. R. (2019). Single and polystorage technologies for renewable-based hybrid energy systems. In Polygeneration with polystorage for chemical and energy hubs (pp. 77-131). Academic Press.

11. Saeed, R. M. R. (2018). Advancement in thermal energy storage using phase change materials. Missouri University of Science and Technology.

12. Schmidt, M., & Linder, M. (2020). A novel thermochemical long term storage concept: balance of renewable electricity and heat demand in buildings. *Frontiers in Energy Research*, 8, 137.

13. Münster, M., Morthorst, P. E., Larsen, H. V., Bregnbæk, L., Werling, J., Lindboe, H. H., & Ravn, H. (2012). The role of district heating in the future Danish energy system. *Energy*, 48(1), 47-55.

14. Hedegaard, K., & Münster, M. (2013). Influence of individual heat pumps on wind power integration–Energy system investments and operation. *Energy Conversion and Management*, 75, 673-684.

15. Klueter, H. H., & Liljedahl, L. A. (1982). Feasibility of wind-powered mechanically-driven heat pump for a dairy.

16. Jwo, C. S., Chien, Z. J., Chen, Y. L., & Chien, C. C. (2013). Development of a wind directly forced heat pump and its efficiency analysis. *International Journal of Photoenergy*, 2013(1), 862547.

17. McQuiston, F. C., Parker, J. D., Spitler, J. D., & Taherian, H. (2023). Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design. John Wiley & Sons.

18. Вплив матеріалу трубчастого теплообмінника на ефективність теплообміну в умовах утворення накипу / І. Лучейко, Р. Коцюрко, В. Коваль // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи», 23-27 лютого 2015 р., Тернопіль, Яремче (УКРАЇНА) – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2015.– С. 120-121

19. Лучейко І. Накип як суттєвий фактор зниження ефективності функціонування конденсаторів: постановка задачі / І. Лучейко, Р. Коцюрко, В. Коваль // Матеріали XVIII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 29-30 жовтня 2014 року — Т. : ТНТУ, 2014 — С. 7.

20. Лучейко І. Розрахунок допустимої товщини накипу за відносним збільшенням гідравлічного опору потоку рідини в трубчастому теплообміннику / І. Лучейко, Р. Коцюрко, В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 13.

21. До розрахунку критерію енергоефективності трубчастого теплообмінника в умовах утворення накипу /Р.В.Коцюрко, І.Д.Лучейко, В.П.Коваль// Матеріали міжнар. наук.- техн. конф. молодих учених та студентів. «Актуальні задачі суч. технологій»: Тези доп. – Тернопіль, грудень 2013. – С. 240

22. Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130.

23. Коваль В. П. Вітроенергетика України: проблеми та перспективи будівництва нових вітрових електростанцій / В. П. Коваль, О. І. Похилий // Матеріали XIV МНТКМУС „Актуальні задачі сучасних технологій“, 11-12 грудня 2025. — Т. : ФОП Паляниця В.А., 2025. — С. 399–401. — (Електротехніка та енергозбереження).

24. Білевич В.Р. Вплив кількості лопатей на енергоефективність вітротурбіни // В.Р. Білевич; А.М.Яковчук; 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. 11-12.

25. Рудик А.І. Енергоефективність двороторної вітроенергетичної установки // А.І.Рудик, 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. 70.

26. 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.

27. 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

28. 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 .

29. 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)

30. Тарасенко, М., Козак, К., Коваль, В. (2026). Модернізація систем теплопостачання в житловому секторі України: виклики, технічні рішення та енергоефективні заходи. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 363(2), 365-370.

31. 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.