

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем  
Освітній ступінь "бакалавр"  
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка  
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

\_\_\_\_\_ А.І.Сегін  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**  
**Бедринському Максиму Віталійовичу**

(прізвище, ім'я по-батькові)

**1. Тема випускної кваліфікаційної роботи**

Автоматизоване управління гібридними системами теплозабезпечення житлових будівель на основі теплових насосів/ Automated control of hybrid heat supply systems of residential buildings based on heat pumps

затверджені наказом по університету від 1 грудня 2025р. №894

**2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи 25 травня 2026р.**

**3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:**

1. Аналіз технологічних процесів гібридних систем теплозабезпечення житлових будівель

1.1. Аналіз існуючих систем опалення та оцінка їх економічної ефективності в умовах України.

1.2. Дослідження теплоенергетичних схем теплових насосів у складі гібридних систем теплозабезпечення.

2. Технічні засоби гібридної системи теплозабезпечення на основі теплових насосів.

2.1. Дослідження конструктивних та функціональних характеристик теплових насосів для систем опалення.

2.2. Аналіз компонентів гібридної системи теплозабезпечення (теплогенераторів, акумулюючих ємностей, циркуляційного обладнання, теплообмінників та допоміжних елементів).

**4. Основні питання, які потрібно розробити:**

1. Провести аналіз сучасних систем теплозабезпечення житлових будівель та визначити економічну доцільність застосування гібридних систем в Україні.

2. Дослідити принципи побудови та функціонування теплоенергетичних схем із використанням теплових насосів та відновлюваних джерел енергії.

3. Виконати аналіз технічних засобів гібридної системи теплозабезпечення та обґрунтувати вибір її компонентів.

4. Розробити алгоритм керування та реалізувати імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink.

## **5. Перелік графічного матеріалу:**

1. UML модель гібридної системи опалення на основі теплового насосу.

## **6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи**

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта        | Підпис, дата   |                  |
|--------|--------------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                                  | Завдання видав | Завдання прийняв |
| 1      | П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС |                |                  |
| 2      | П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС |                |                  |
| 3      | П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС |                |                  |

## **7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025р.**

### **КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів роботи                                                                | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ | 01.12.2025-15.01.2026         | виконано |
| 2     | ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ     | 16.01.2026-15.03.2026         | виконано |
| 3     | РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ             | 16.03.2026-30.04.2026         | виконано |
| 4.    | Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату   | 1.05.2026-25.05.2026          | виконано |

Студент

Максим БЕДРИНСЬКИЙ

(підпис)

Керівник роботи

к.т.н., доц. Петро ГУМЕННИЙ

(підпис)

## АНОТАЦІЯ

Бедринський М.В. Автоматизоване управління гібридними системами теплозабезпечення житлових будівель на основі теплових насосів/. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Західноукраїнський національний університет. Тернопіль, 2026.

У роботі розроблено автоматизовану систему теплозабезпечення житлових будівель на основі теплових насосів. Досліджено принципи побудови модульної архітектури системи з тепловими насосами. Проаналізовано сучасні підходи та компоненти для реалізації гібридної системи опалення на основі теплових насосів.

## ANOTATION

Bedrynsky M.V. A Automated control of hybrid heat supply systems of residential buildings based on heat pumps. – Manuscript.

Research for the Bachelor's degree in specialty 174 "Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics", educational and professional program "Automation and Computer-Integrated Technologies" – West Ukrainian National University. Ternopil, 2026.

The study presents the development of an automated heat supply system for residential buildings based on heat pumps. The principles of building a modular system architecture with heat pumps are investigated. Modern approaches and components for the implementation of a hybrid heating system based on heat pumps are analyzed.

## ЗМІСТ

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                     | 9  |
| 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ .....    | 11 |
| 1.1 Аналіз систем опалення та оцінка їх економічної доцільності для України .....              | 11 |
| 1.2 Аналіз теплоенергетичних схем теплових насосів у складі гібридних систем опалення .....    | 17 |
| 1.3 Дослідження інтеграції теплових насосів з відновлюваними джерелами енергії.....            | 23 |
| 2. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ.....         | 32 |
| 2.1 Аналіз теплових насосів для гібридної системи опалення.....                                | 32 |
| 2.2 Аналіз компонентів системи гібридного теплозабезпечення на основі теплового насосу .....   | 43 |
| 2.3 Аналіз пристроїв управління гібридною системою опалення на основі теплового насосу.....    | 65 |
| 3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ.....                 | 62 |
| 3.1 Розрахунок моделі гібридної системи опалення з тепловим насосом .....                      | 62 |
| 3.2 Розробка алгоритму управління гібридною системою опалення на основі теплового насосу ..... | 72 |
| 3.3 Розробка SIMULINK моделі гібридної системи опалення на основі теплового насосу .....       | 87 |

|           |      |                |        |      |                                                                                                               |                          |      |
|-----------|------|----------------|--------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------|
|           |      |                |        |      | ДП.АКІТ1138779                                                                                                |                          |      |
| Змн.      | Арк. | № докум.       | Підпис | Дата |                                                                                                               |                          |      |
| Розроб.   |      | Бедринський М. |        |      | Автоматизоване управління гібридними системами теплозабезпечення житлових будівель на основі теплових насосів | Літ.                     | Арк. |
| Перевір.  |      | Гуменний П.В.. |        |      |                                                                                                               |                          | 6    |
| Консульт. |      |                |        |      |                                                                                                               | ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42/1<br>4 |      |
| Н. Контр. |      | Заставний О.   |        |      |                                                                                                               |                          |      |
| Затверд.  |      | Сегін А.І..    |        |      |                                                                                                               |                          |      |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| ВИСНОВКИ.....                   | 88 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 90 |
| ДОДАТОК А.....                  | 93 |

|      |      |          |        |      |                 |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------|------|
|      |      |          |        |      | ДПАКІТ.11387779 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                 | 5    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                 |      |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ – автоматизована система управління  
АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом  
ТН – тепловий насос  
ГСТ – гібридна система теплозабезпечення  
ГВП – гаряче водопостачання  
ВДЕ – відновлювані джерела енергії  
SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – система диспетчерського керування та збору даних  
ПЛК – програмований логічний контролер  
HMI (Human Machine Interface) – людино-машинний інтерфейс  
BMS (Building Management System) – система керування інженерними системами будівлі  
IoT (Internet of Things) – інтернет речей  
AI (Artificial Intelligence) – штучний інтелект  
PID (Proportional–Integral–Derivative) – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор  
COP (Coefficient of Performance) – коефіцієнт перетворення теплоти теплового насоса  
SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) – сезонний коефіцієнт енергоефективності  
PV (Photovoltaic) – фотоелектрична система  
PV/T – комбінована фотоелектрично-теплова система  
RES (Renewable Energy Sources) – відновлювані джерела енергії  
CO<sub>2</sub> – діоксид вуглецю  
КГУ – когенераційна установка  
ККД – коефіцієнт корисної дії  
ТЕЦ – теплоелектроцентраль  
RCD (Refrigerant Cycle Diagnostic) – система діагностики холодильного циклу  
ДБН – державні будівельні норми  
B0/W35 – стандартний режим випробування теплового насоса (джерело 0 °C / теплоносії 35 °C)  
B10/W35 – стандартний режим випробування теплового насоса (джерело +10 °C / теплоносії 35 °C)

|      |      |          |        |      |                 |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------|------|
|      |      |          |        |      | ДПАКІТ.11387779 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                 | 6    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                 |      |

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Сучасний розвиток енергетики та житлово-комунального господарства України характеризується зростаючими вимогами до енергоефективності, екологічності та економічності систем теплозабезпечення. В умовах підвищення вартості енергоресурсів, обмеження традиційних джерел енергії та необхідності зменшення викидів парникових газів особливої актуальності надається впровадження альтернативних та відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних напрямків є використання теплових насосів у поєднанні з традиційними джерелами тепла, що формує так звані гібридні системи теплозабезпечення.

Гібридні системи на основі теплових насосів можуть значно підвищити ефективність використання енергоресурсів, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити гнучкість у виборі режимів роботи залежно від зовнішніх умов. Проте ефективне функціонування таких систем неможливо без використання сучасних засобів автоматизації, які забезпечують оптимальне керування режимами роботи обладнання, адаптованого до змінених умов експлуатації та координації роботи різних джерел тепла.

У сучасних умовах перед системами теплозабезпечення житлових будівель постають важливі завдання: забезпечення комфортних умов проживання, зниження енергоспоживання, підвищення надійності та довговічності обладнання. Розв'язання цих завдань потребує розробки та впровадження автоматизованих систем управління, які здатні забезпечити інтелектуальне регулювання параметрів теплопостачання з урахуванням погодних умов, теплового навантаження та режимів експлуатації будівлі.

Одним із ключових факторів підвищення ефективності гібридних систем є автоматизоване управління їх роботою, що дозволяє оптимізувати розподіл теплових потоків, мінімізувати витрати енергії та забезпечити стабільність функціонування системи в цілому. Використання сучасних методів керування та інформаційних технологій відкриває можливості для

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 9    |

створення адаптивних та енергоефективних систем теплозабезпечення нового покоління.

**Мета кваліфікаційної роботи.** Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності функціонування гібридних систем теплозабезпечення житлових будівель на основі теплових насосів шляхом розробки автоматизованої системи управління. Для досягнення поставленої мети вимагається створення структури системи опалення, яка забезпечує оптимальний розподіл теплового навантаження між джерелами тепла та адаптацію до змінених умов експлуатації.

**Об'єкт дослідження** – процеси функціонування гібридних систем теплозабезпечення житлових будівель із використанням теплових насосів.

**Предмет дослідження** – методи, алгоритми та засоби автоматизованого управління гібридними системами теплозабезпечення на основі теплових насосів.

**Методи дослідження.** У роботі використовуються методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, математичного моделювання та аналізу енергетичних процесів. Також проведено огляд сучасних наукових джерел і технічних рішень у сфері автоматизації систем теплозабезпечення.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблені структурні рішення та алгоритми автоматизованого управління можуть бути використані при проектуванні та модернізації гібридних систем теплозабезпечення житлових будівель. Запропоновані підходи сприяють підвищенню енергоефективності, зниженню експлуатаційних витрат та покращенню якості теплопостачання.

**Апробації.** Бедринський М.В. Автоматизоване управління гібридними системами теплозабезпечення житлових будівель на основі теплових насосів/ М.В. Бедринський, П.В. Гуменний // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. с.133-139.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

# 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

## 1.1 Аналіз систем опалення та оцінка їх економічної доцільності для України

Вибір системи опалення є одним із ключових інженерно-економічних рішень як при проектуванні нових будівель, так і при модернізації існуючого житлового фонду. У сучасній світовій практиці використовуються п'ять основних типів систем опалення: газові котли, електрокотли, когенераційні установки, пелетні котли та теплові насоси. Кожна з них має специфічні техніко-економічні характеристики, що визначають доцільність її застосування залежно від регіону, стану енергетичної інфраструктури та ціни на енергоносії.

Газові котли «залишаються найпоширенішою системою опалення в Європі та Україні. Сучасні конденсаційні газові котли мають ККД до 97–98% і є відносно доступними за ціною встановлення — від 2 до 5 тисч євро на ринку Центральної Європи (HeatPumpsWatch, 2026). У дослідженні Технічного університету Мюнхена, яке порівнювало 13 систем опалення, газовий котел демонстрував порівняно низькі операційні витрати, проте серед усіх систем мав найвищі показники викидів парникових газів навіть у поєднанні зі сонячними колекторами для гарячого водопостачання (рисунк 1.1)» [1].

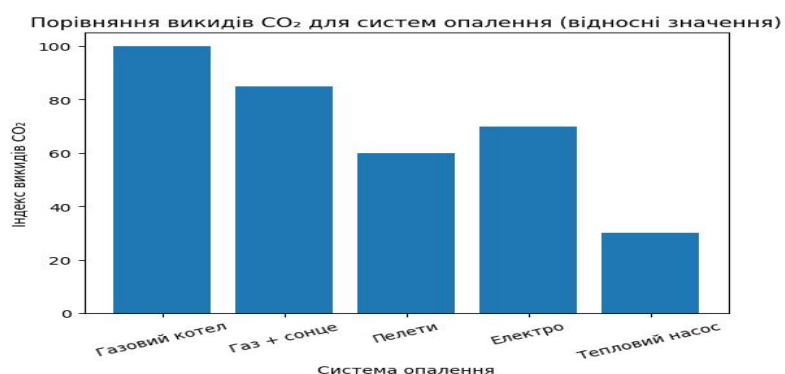


Рисунок 1.1- Порівняння викидів парникових газів різних систем опалення

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

В «умовах України до цих системних недоліків додається критичний безпековий фактор: запаси природного газу влітку 2024 року становили лише 9 млрд кубометрів — найнижчий показник за 11 років, що свідчить про загрозу енергетичній безпеці країни внаслідок воєнних дій та зупинки транзиту через територію росії. Діючий тариф на природний газ для населення становить 7,96 грн/м<sup>3</sup> та залишається фіксованим до квітня 2026 року в рамках мораторію, введеного на час воєнного стану. При цьому ринкові аналітики прогнозують поетапне підвищення тарифів після скасування воєнного стану до економічно обґрунтованих значень. За спрощеним розрахунком, середньостатистичний будинок площею 100 м<sup>2</sup> споживає близько 1 000–1 500 м<sup>3</sup> газу за опалювальний сезон, що при поточному тарифі становить 7 960–11 940 грн на сезон» [1].

Електрокотли є технічно найпростішими системами опалення з ККД, що наближається до 100% — вся спожита електрична енергія перетворюється на теплову. Проте з точки зору вартості одиниці тепла вони поступаються іншим системам. З «1 червня 2024 року тариф на електроенергію для побутових споживачів становить 4,32 грн/кВт·год. Для власників електроопалювальних систем в опалювальний сезон діє пільговий тариф: перші 2 000 кВт·год на місяць коштують 2,64 грн/кВт·год. За прогнозами, з червня 2025 року тариф може зрости до 6,64 грн/кВт·год, а протягом 2–3 наступних років — до 9 грн/кВт·год відповідно до зобов'язань перед МВФ щодо приведення цін до ринкового рівня» [2]. Для будинку площею 100 м<sup>2</sup> в центральному регіоні України, де середня потреба в тепловій енергії за опалювальний сезон складає близько 12 000–15 000 кВт·год, витрати на електроопалення при пільговому тарифі становитимуть 31 680–39 600 грн на сезон, що в 3–4 рази перевищує вартість газового опалення за поточними тарифами (рисунк1.2).

Когенераційні установки (КГУ) «реалізують принцип комбінованого виробництва електричної та теплової енергії з одного джерела палива. Завдяки одночасному виробництву електроенергії та тепла загальний ККД

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

когенераційних установок може сягати 85–90%, що значно перевищує ефективність окремих електростанцій і котелень.



Рисунок 1.2- Порівняння вартості використання різних систем опалення

Вартість енергії власної міні-ТЕЦ є нижчою від тарифів на 40–60%, що дозволяє установці окупатися за 2–4 роки залежно від параметрів та умов експлуатації. Проте собівартість продуктів когенерації є досить високою, якщо враховувати вартість самої установки, її монтажу та експлуатації. В Україні з 22 березня 2024 року запрацювали нові правила кваліфікації когенераційних установок, адаптовані до директив ЄС. Високоєфективні установки отримали податкову пільгу — звільнення від акцизного збору в розмірі 3,2% на дохід від реалізації електроенергії. Попри це, когенерація залишається передусім рішенням для промислових підприємств, комунальних закладів та великих житлових комплексів, де є стабільний одночасний попит і на тепло, і на електроенергію. Для індивідуального приватного будинку вона економічно нераціональна через надмірну початкову інвестицію» [3].

Пелетні котли «використовують як паливо деревні гранули (пелети) - стандартизований біопаливний продукт. Пелетні котли досягають одного з

найвищих показників ККД серед твердопаливних котлів, який часто перевищує 90%. Залежність від електроенергії для роботи механізму подачі пелет і систем управління є суттєвим недоліком в умовах систематичних відключень електроенергії в Україні. Ціна пелетних котлів на українському ринку починається від 50 000 грн за базові моделі. На міжнародному ринку, зокрема в Центральній Європі, вартість пелетних котлів із облаштуванням складу для зберігання палива становить від 18 000 до 30 000 євро. Обслуговування генеруючих установок суттєво відрізняється за вартістю залежно від типу технології. Найвищі експлуатаційні витрати характерні для пелетних котлів (300–600 €/рік), що обумовлено необхідністю очищення та обслуговування механічних вузлів. Газові котли мають помірний рівень витрат (100–350 €/рік), пов'язаний із регламентним технічним обслуговуванням. Найнижчі витрати характерні для теплових насосів (50–150 €/рік), що пояснюється відсутністю процесів горіння та меншою кількістю обслуговуваних компонентів» [3].



Рисунок 1.3- Графік порівняння вартості систем опалення

Теплові насоси є технологічно «найефективнішою системою опалення, оскільки не генерують тепло безпосередньо, а переносять його з навколишнього середовища до приміщення. Сучасні теплові насоси, доступні

на ринку, є в 3–5 разів енергоефективнішими за газові котли. [3]. Ключовим показником їх ефективності є коефіцієнт перетворення теплоти (COP). Для теплових насосів типу «повітря–вода», випробуваних у незалежних лабораторіях, середнє значення COP становить близько 3,2 (при температурі повітря +2°C і температурі теплоносія +35°C), а для насосів типу «ґрунт–вода» — 4,3. | Отже, 1 кВт·год спожитої електроенергії дозволяє отримати 3,2–4,3 кВт·год теплової енергії. Однак при температурі повітря нижче –20°C тепловий насос типу «повітря–вода» переходить у режим, що аналогічний роботі звичайного електродкотла, і може видавати лише тепло, еквівалентне спожитій електроенергії. У 2024 році продажі теплових насосів у світі перевищили продажі газових котлів на 30% — це найбільший розрив за всю історію спостережень, за даними IEA GlobalEnergyReview 2025» (рисунок 1.4) [4].

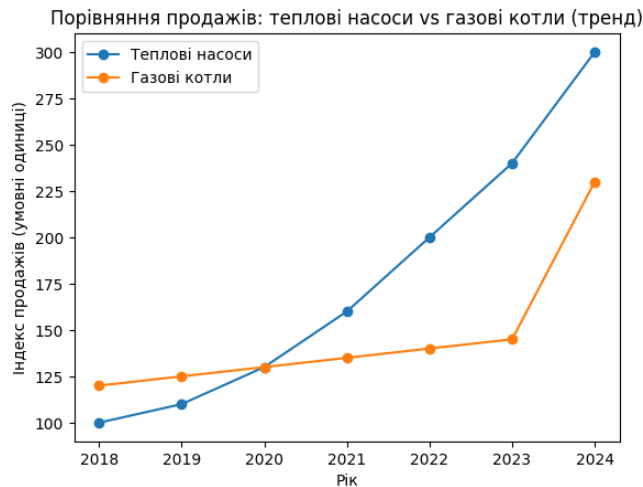


Рисунок 1.4- Порівняння продажів теплових насосів і газових котлів.

В умовах воєнного стану в Україні вибір оптимальної системи опалення обумовлений трьома специфічними факторами: нестабільністю газопостачання через втрату транзиту та пошкодження інфраструктури, систематичними відключеннями електроенергії внаслідок ракетних ударів по енергетичних об'єктах, а також мораторієм на підвищення тарифів на газ і тепло, який штучно знижує поточну вартість газового опалення відносно ринкових значень.

Таблиця 1 нижче узагальнює порівняльні характеристики розглянутих систем за ключовими показниками в умовах України (2024–2025 рр.).

Таблиця 1.1 Ключові характеристики різних систем опалення

| Показник                         | Газовий котел    | Електро котел         | КГУ                   | Пелетний котел    | Тепловий насос        |
|----------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| ККД / COP                        | 95–98%           | ~100%                 | 85–90% сум.           | 90–97%            | COP 2,5–4,5           |
| Тариф на паливо (Україна)        | 7,96 грн/м³      | 2,64–4,32 грн/кВт·год | газ 7,96 грн/м³       | ~4–6 грн/кг       | 2,64–4,32 грн/кВт·год |
| Витрати на сезон (100 м²)        | 7 960–11 940 грн | 31 680–63 000 грн     | залежить від масштабу | 15 000–20 000 грн | 8 000–14 000 грн      |
| Початкові інвестиції             | 60–120 тис. грн  | 20–40 тис. грн        | 500+ тис. грн         | 80–200 тис. грн   | 150–400 тис. грн      |
| Ризик під час виділення ключових | Низький          | Критичний             | Низький               | Середній          | Середній              |
| Залежність від імпорту газу      | Висока           | Відсутня              | Висока                | Відсутня          | Відсутня              |

Навіть при поточних тарифах опалення тепловим насосом із нічним тарифом є дешевшим від газового опалення приблизно на 84%, а вартість 1 кВт теплової енергії, отриманої тепловим насосом при нічному тарифі, становить близько 65 копійок.

З огляду на сукупність чинників, у довгостроковій перспективі найбільш економічно доцільним рішенням для приватного будинку в Україні є тепловий насос типу «повітря–вода». Дослідження «Технічного університету Мюнхена 2024 року, яке порівнювало 13 систем опалення з використанням комплексного аналізу витрат за весь життєвий цикл та оцінки екологічного впливу, встановило, що найкращий результат демонструє комбінація теплового насоса «повітря–вода» із сонячними фотоелектричними панелями, яка забезпечила на 17% нижчий екологічний вплив і на 6% менші сукупні витрати за весь термін служби порівняно з сучасним газовим котлом»[5]. Разом із тим для умов України необхідно враховувати такі обмеження: висока початкова вартість встановлення (150–400 тис. грн) та

залежність від електроенергії в умовах систематичних відключень. Для підвищення стійкості до відключень та зниження початкових інвестицій доцільна гібридна схема: тепловий насос в парі з газовим або пелетним котлом як резервним джерелом тепла.

Для домогосподарств із обмеженим бюджетом або в регіонах, де газопостачання є надійним, у короткостроковому горизонті планування газовий конденсаційний котел залишається оптимальним варіантом за співвідношенням ціна/якість. Проте з урахуванням прогнозованого підвищення тарифів на газ після скасування воєнного стану та стратегічної мети енергонезалежності України від країни-агресора, пріоритет у середньо- та довгостроковому плані слід віддавати технологіям, що не залежать від природного газу — тепловим насосам.

## 1.2 Аналіз теплоенергетичних схем теплових насосів у складі гібридних систем опалення

Гібридні системи теплопостачання на основі теплових насосів є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасної теплоенергетики, що обумовлено необхідністю підвищення енергоефективності, зменшення споживання традиційних енергоресурсів та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Такі системи являють собою складні інженерні комплекси, у яких тепловий насос функціонує у поєднанні з іншими джерелами теплової енергії, (рисунки 1.5) забезпечуючи оптимальний режим роботи залежно від зовнішніх умов, теплового навантаження та економічних факторів. Основою функціонування гібридних систем є принцип комбінованого використання різних джерел теплової енергії, що дозволяє компенсувати недоліки кожного з них. Зокрема, теплові насоси «характеризуються високою енергоефективністю, яка визначається коефіцієнтом перетворення енергії (COP), однак їх ефективність значною мірою залежить від температури джерела низькопотенційного тепла. При зниженні температури зовнішнього

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 17   |

середовища ефективність теплового насоса зменшується, що обумовлює необхідність використання додаткових джерел тепла. Саме тому в гібридних системах широко застосовуються газові, електричні або твердопаливні котли, які забезпечують покриття пікових теплових навантажень.

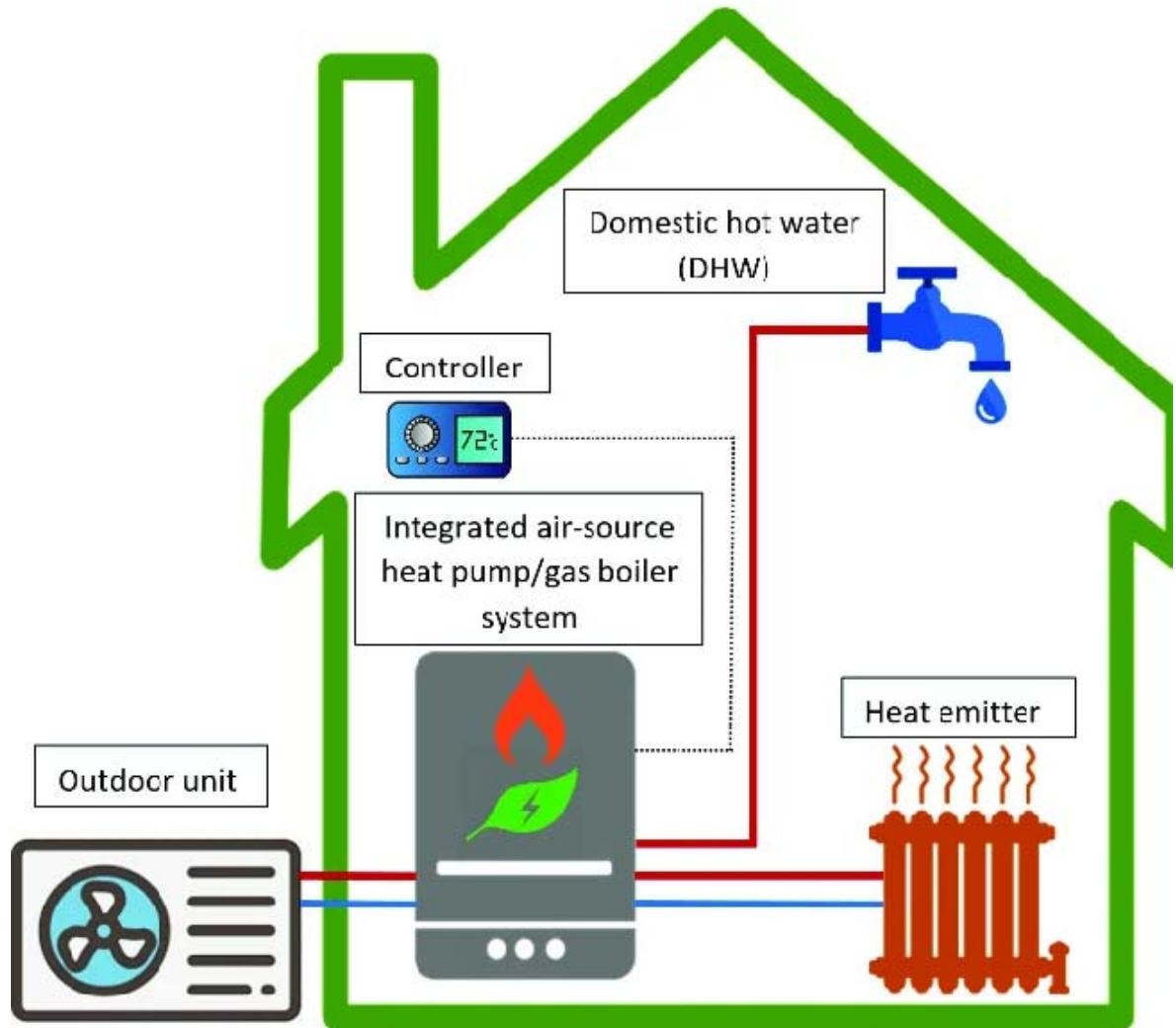


Рисунок 1.5- Гібридна система опалення на основі теплового насоса та газового котла

Принципова побудова гібридної системи базується на структурній інтеграції декількох функціональних підсистем, кожна з яких виконує визначену роль у загальному тепловому балансі. До складу такої системи входить джерело низькопотенційного тепла, яким може бути атмосферне повітря, ґрунт або підземні води. Вибір джерела визначається кліматичними умовами, геологічними особливостями та економічною доцільністю. Наприклад, ґрунтові теплові насоси характеризуються стабільністю

температурного режиму (рисунок 1.6), тоді як повітряні мають нижчу вартість впровадження, але більш залежні від погодних умов» [6].

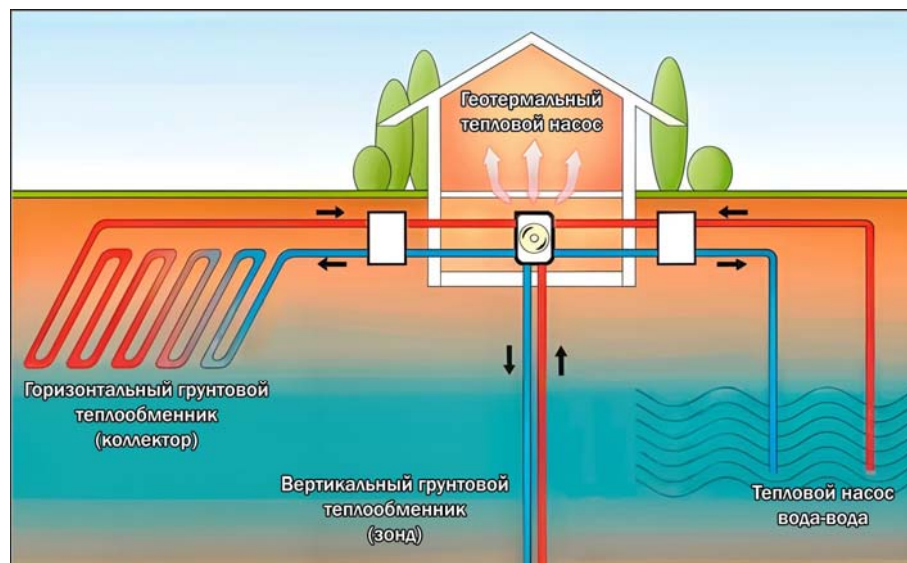


Рисунок 1.6- Схема роботи теплового насоса

Принцип роботи геотермальної системи теплового насоса полягає «у перенесенні теплової енергії з низькопотенційного джерела, яким виступають ґрунт або підземні води, до системи опалення будівлі із використанням замкненого термодинамічного циклу. Джерелом тепла можуть бути горизонтальні ґрунтові колектори, прокладені на невеликій глибині, вертикальні свердловини із зануреними теплообмінними зондами або системи типу «вода-вода», що використовують енергію підземних вод. У всіх цих варіантах циркулює теплоносій, як правило, на основі антифризу, який здатний поглинати теплову енергію навіть при відносно низьких температурах середовища, зокрема в діапазоні  $+5...+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Нагрітий теплоносій надходить до теплового насоса, де через теплообмінник передає свою енергію холодоагенту. У випарнику холодоагент, отримуючи тепло, переходить у газоподібний стан, після чого потрапляє до компресора. У процесі стискання його тиск і температура суттєво зростають, досягаючи значень, достатніх для ефективної передачі тепла системі опалення. Далі гарячий холодоагент надходить до конденсатора, де віддає накопичену теплову енергію теплоносію системи опалення, що забезпечує нагрівання радіаторів або системи теплої підлоги. У

результаті цього процесу холодоагент конденсується, переходячи з газоподібного у рідкий стан, що представлено на наступному рисунку 1.7» [7].

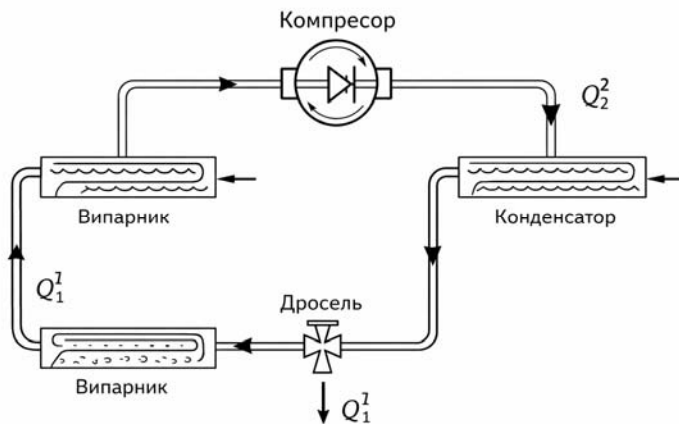


Рисунок 1.7- Принципова схема термодинамічного циклу теплового насоса (компресійний цикл)

Після проходження дросельного пристрою, де відбувається зниження тиску і температури, холодоагент знову надходить у випарник, що забезпечує безперервність циклу. Одночасно охолоджений теплоносії повертається у ґрунтовий або водяний контур для повторного нагрівання, утворюючи замкнений цикл теплообміну. Таким чином, система функціонує за принципом перенесення тепла, а не його генерації, причому електрична енергія витрачається лише на привід компресора та допоміжних елементів, тоді як основна частина теплової енергії, що може досягати 70–80 %, надходить із навколишнього середовища.

Застосування таких систем забезпечує використання відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та гнучкість реалізації залежно від умов експлуатації. Можливість використання різних типів теплообмінників, а також наявність замкнутого контуру теплообміну роблять систему універсальною та надійною. Висока ефективність роботи підтверджується значеннями коефіцієнта перетворення енергії, які зазвичай знаходяться в межах 3–5, що свідчить про доцільність застосування геотермальних теплових насосів у сучасних системах тепlopостачання.

Центральним елементом системи є тепловий насос (рисунок 1.8), «який реалізує термодинамічний цикл перенесення теплової енергії. Його робота базується на використанні холодильного циклу з компресією пари, що включає випарник, компресор, конденсатор та дросельний пристрій.

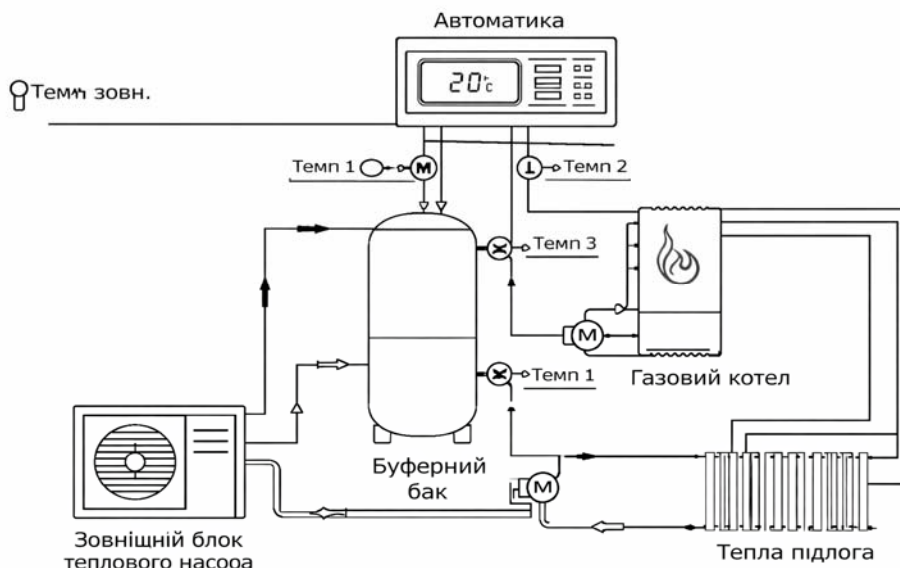


Рисунок 1.8- Принципова схема гібридної системи опалення приватного будинку з тепловим насосом і газовим котлом

У випарнику відбувається відбір тепла від навколишнього середовища, після чого холодоагент стискається компресором, підвищуючи свою температуру і тиск. У конденсаторі тепло передається теплоносію системи опалення, після чого цикл повторюється. Допоміжне джерело тепла в гібридній системі виконує функцію резервного або пікового теплогенератора. Його включення відбувається у випадках, коли тепловий насос не здатний забезпечити необхідну теплову потужність або коли його експлуатація є економічно недоцільною. Таким чином, реалізується принцип бівалентності, який передбачає розподіл теплового навантаження між кількома джерелами енергії» [8].

Важливим елементом гібридної системи є буферний бак (акумулятор тепла), яка виконує функції гідравлічного розділювача та накопичувача теплової енергії. Використання буферної ємності дозволяє зменшити кількість пусків компресора, що позитивно впливає на ресурс обладнання, а

також забезпечує більш рівномірний режим роботи системи. Крім того, буферні ємності дають можливість акумулювати теплову енергію у періоди низького тарифу на електроенергію та використовувати її в пікові години споживання.

Система розподілу тепла забезпечує передачу теплової енергії до кінцевих споживачів і може включати радіаторні системи, системи теплої підлоги або комбіновані рішення( рисунок 1.9). Особливістю теплових насосів є їх ефективна робота при низькотемпературних режимах (30–50 °С), що робить доцільним використання систем теплої підлоги.

Ключову роль у забезпеченні ефективного функціонування гібридної системи відіграє система автоматичного управління. Вона забезпечує координацію роботи всіх елементів системи, оптимізацію режимів роботи та адаптацію до змінних умов експлуатації. Сучасні системи управління базуються на використанні програмованих логічних контролерів або спеціалізованих мікропроцесорних пристроїв, які реалізують складні алгоритми регулювання. До таких алгоритмів належать погодозалежне управління, яке враховує температуру зовнішнього повітря, оптимізація енергоспоживання на основі тарифів електроенергії, а також PID-регулювання температури теплоносія.

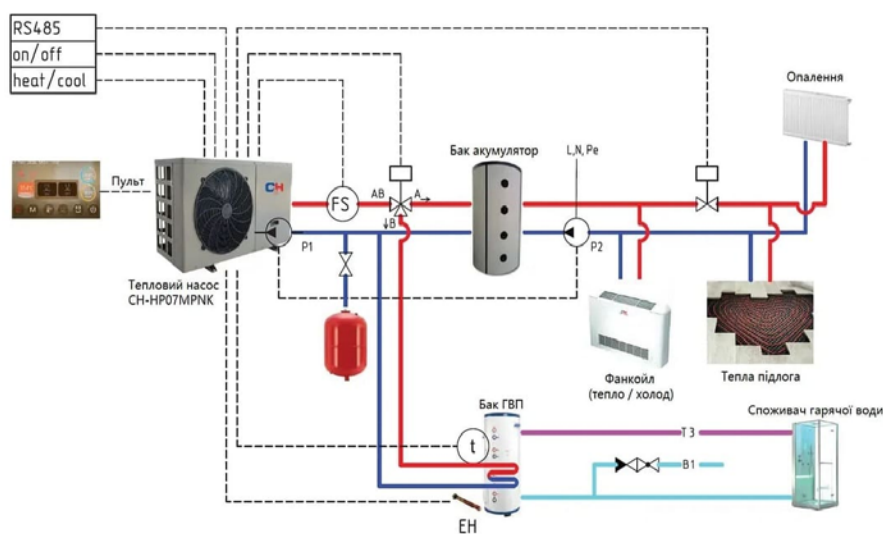


Рисунок 1.9- Система опалення на основі теплового насоса з теплою підлогою та радіаторами

Функціонування гібридної системи можна описати на основі рівняння теплового балансу, яке відображає взаємозв'язок між енергією, отриманою з навколишнього середовища, спожитою електричною енергією та корисною тепловою енергією, переданою споживачу. Це дозволяє оцінити ефективність системи та визначити оптимальні режими її роботи.

Таким чином, загальні принципи побудови гібридних систем з тепловими насосами ґрунтуються на інтеграції різних джерел теплової енергії, використанні акумулюючих елементів та впровадженні інтелектуальних систем управління. Такий підхід забезпечує високу енергоефективність, надійність та адаптивність системи до змінних умов експлуатації, що є особливо актуальним у сучасних умовах розвитку енергетики.

### 1.3 Дослідження інтеграції теплових теплових насосів з відновлюваними джерелами енергії

Теплові насоси класифікуються за типом джерела низькопотенційного тепла та способом передачі теплової енергії до споживача, що визначає їх конструктивні особливості, ефективність та сферу застосування. Найбільш поширеними є системи типу «повітря–повітря», «повітря–вода», «вода–вода» та «ґрунт–вода», кожна з яких має свої технічні характеристики та експлуатаційні переваги.

Теплові насоси типу «повітря–повітря» (рисунок 1.10) є «одними з найбільш поширених рішень у системах опалення та кондиціювання завдяки своїй конструктивній простоті та відносно низькій вартості впровадження. Принцип їх роботи полягає у відборі теплової енергії з атмосферного повітря зовнішнім блоком, де розташований випарник, та передачі цієї енергії безпосередньо у внутрішній простір будівлі через внутрішній теплообмінник (конденсатор). Такі системи фактично реалізуються у вигляді інверторних кондиціонерів, здатних працювати як у режимі охолодження, так і у режимі

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 23   |

обігріву. Важливою особливістю є використання реверсивного холодильного циклу, що дозволяє змінювати напрямок перенесення тепла.

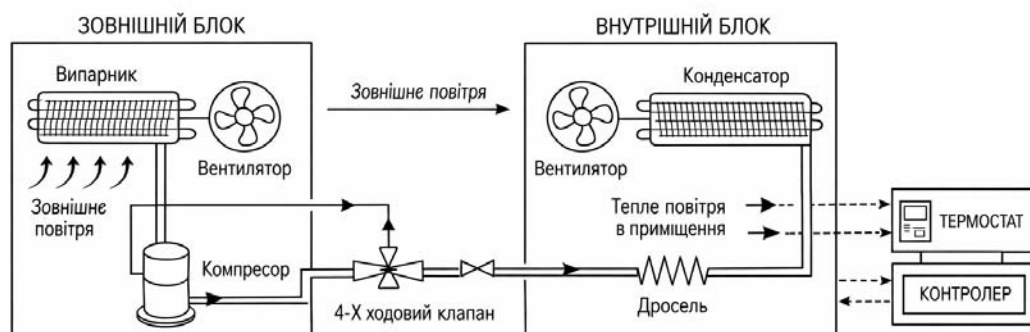


Рисунок 1.10- Система опалення на основі теплового насосу «повітря-повітря»

Ефективність теплових насосів «повітря–повітря» визначається коефіцієнтом перетворення енергії, який суттєво залежить від температури зовнішнього повітря. При зниженні температури зовнішнього середовища зменшується теплосприйняття випарника, що призводить до зниження продуктивності системи та збільшення споживання електроенергії. Крім того, при низьких температурах виникає проблема обмерзання теплообмінника зовнішнього блоку, що потребує періодичного проведення циклів розморожування (defrost), під час яких система тимчасово втрачає ефективність. Саме тому в умовах холодного клімату такі теплові насоси часто використовуються як допоміжне джерело тепла або в комбінації з іншими теплогенераторами» [9].

Теплові насоси типу «повітря–вода» (рисунок 1.11) є більш універсальними, оскільки «забезпечують передачу теплової енергії у водяний контур системи опалення. Це дозволяє інтегрувати їх із традиційними інженерними системами будівлі, такими як радіаторне опалення, системи теплої підлоги або фанкойли. Конструктивно такі системи включають зовнішній блок для відбору тепла з повітря та внутрішній гідромодуль, який здійснює передачу тепла теплоносію. Завдяки цьому забезпечується можливість централізованого опалення будівлі та підготовки гарячої води» [9].

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 24   |

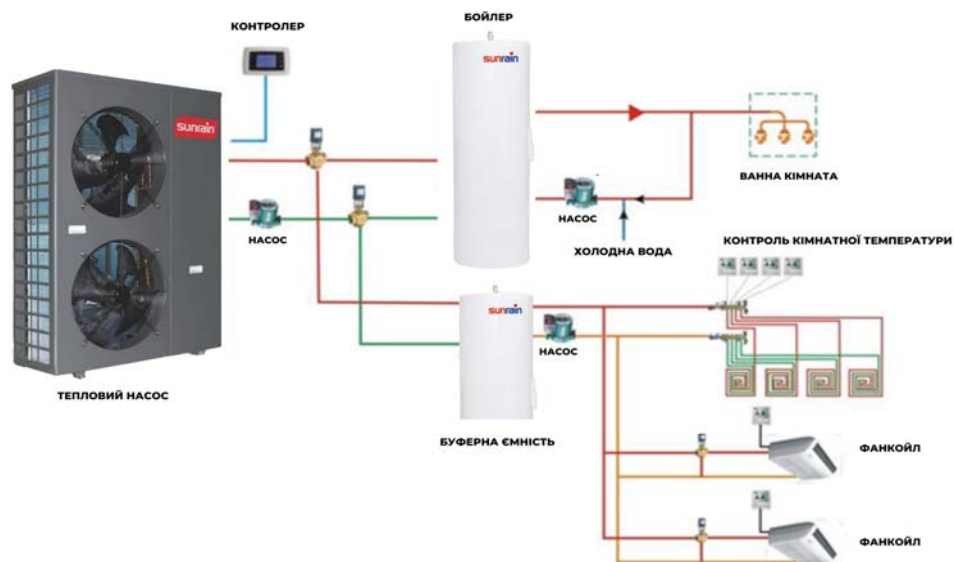


Рисунок 1.11- Тепловий насос «повітря-вода»

Системи типу «вода–вода» (рисунок 1.12) «використовують тепло підземних або поверхневих вод, що характеризуються відносно стабільною температурою протягом року. Це забезпечує високий коефіцієнт перетворення енергії та ефективну роботу незалежно від сезонних коливань температури. Однак реалізація таких систем потребує наявності водних ресурсів та дотримання екологічних вимог. Найбільш ефективними з точки зору стабільності роботи є теплові насоси типу «грунт–вода», які використовують геотермальну енергію через горизонтальні колектори або вертикальні зонди. Завдяки відносно постійній температурі ґрунту такі системи забезпечують високу енергоефективність, проте характеризуються значними початковими витратами на монтаж» [10].



Рисунок 1.12- Тепловий насос «вода-вода»

Сучасні тенденції розвитку теплових насосів передбачають їх інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії, зокрема сонячними колекторами та фотоелектричними панелями. Використання сонячних теплових колекторів дозволяє здійснювати попередній нагрів теплоносія або акумулювати теплову енергію у буферних ємностях, що зменшує навантаження на тепловий насос та підвищує загальну ефективність системи. У таких схемах сонячний колектор підключається до буферного бака через окремий контур з циркуляційним насосом і теплообмінником, а система автоматичного управління визначає пріоритет використання сонячної енергії залежно від температурних умов.

Інтеграція фотоелектричних панелей забезпечує часткове або повне покриття електроспоживання теплового насоса, що дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати та підвищити енергетичну автономність системи. У цьому випадку електрична енергія, що генерується сонячними панелями, використовується для живлення компресора, циркуляційних насосів та системи управління. Для підвищення ефективності роботи таких систем застосовуються інвертори, акумуляторні батареї та інтелектуальні системи управління, які оптимізують споживання енергії залежно від режимів генерації та навантаження.

Таким чином, вибір типу теплового насоса визначається умовами експлуатації, доступністю джерел енергії та економічною доцільністю, а інтеграція з відновлюваними джерелами дозволяє створити вискоелефективні гібридні системи теплопостачання, що відповідають сучасним вимогам енергоефективності та екологічності.

Інтеграція теплових насосів з відновлюваними джерелами енергії (рисунк 1.13) є одним із ключових напрямів сучасної енергетики, що спрямований на підвищення енергоефективності систем теплопостачання та зменшення залежності від викопного палива. Поєднання теплового насоса із сонячними колекторами, фотоелектричними панелями або геотермальними системами дозволяє створити комплексні рішення, які максимально

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 26   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

використовують потенціал відновлюваних джерел при одночасному забезпеченні надійного теплопостачання. Основними передумовами для такої інтеграції є нестабільність генерації відновлюваної енергії в часі, необхідність акумулювання надлишкової енергії, потреба у резервуванні теплопостачання в несприятливих кліматичних умовах, а також економічна доцільність зниження експлуатаційних витрат. Саме тепловий насос, завдяки здатності перетворювати низькопотенційне тепло на теплову енергію вищого потенціалу, виступає ефективним сполучним елементом між нестабільними відновлюваними джерелами та системою теплопостачання будівлі.

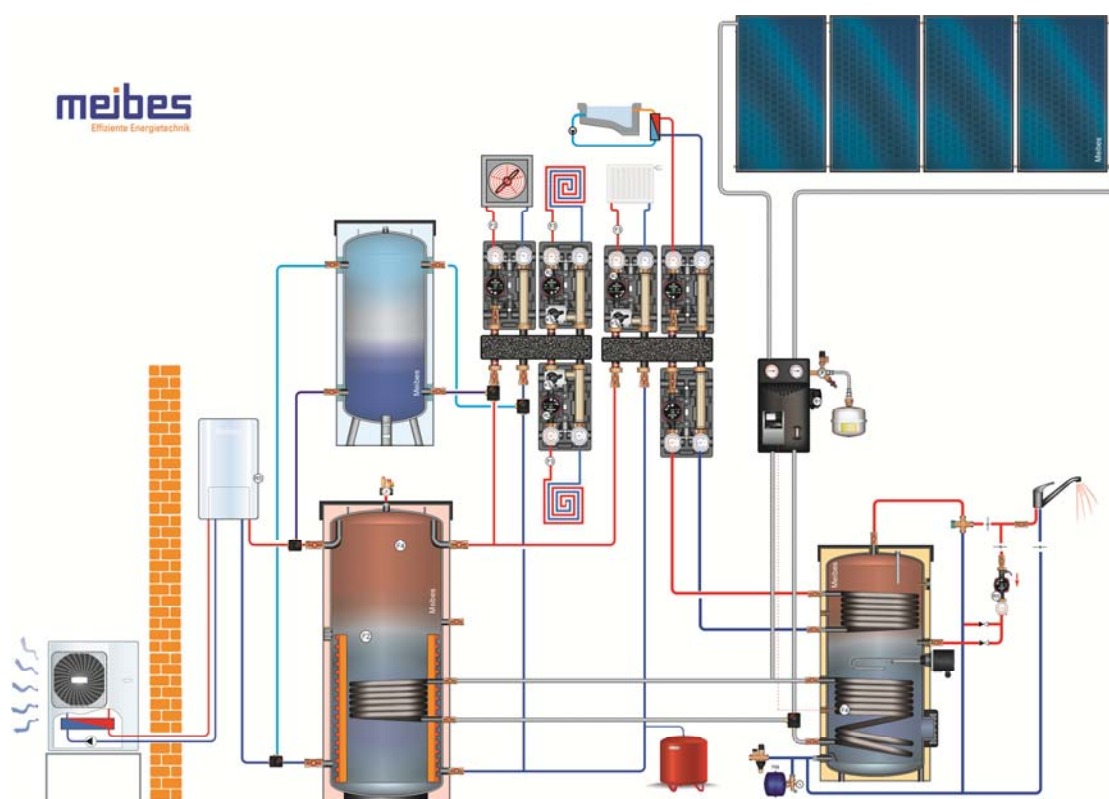


Рисунок 1.13- Схема роботи теплового насосу з фотоелектричними панелями

Одним із найпоширеніших варіантів інтеграції є поєднання теплового насоса із сонячними тепловими колекторами, що представлено на рисунку 1.14. У таких схемах сонячні колектори виконують функцію попереднього нагріву теплоносія або безпосереднього поповнення теплового акумулятора, що суттєво знижує навантаження на компресор та підвищує коефіцієнт перетворення енергії. Розрізняють послідовну та паралельну схеми інтеграції.

У послідовній схемі сонячний колектор підігріває теплоносії до певного рівня температури, після чого тепловий насос доводить його до необхідної робочої температури системи опалення. Паралельна схема передбачає незалежну роботу сонячного колектора та теплового насоса з подачею тепла до спільного буферного акумулятора, де система управління визначає пріоритет джерела залежно від рівня сонячної радіації та поточного температурного стану накопичувача. З точки зору автоматизації, схема управління включає диференційні термостати, контролер сонячного контуру, насосні групи з регулюванням витрати та датчики температури у кількох точках системи. Алгоритм управління реалізує пріоритет використання сонячної енергії, запобігає перегріву колектора та здійснює плавне перемикання між джерелами тепла. Практичні дослідження підтверджують, що застосування сонячних теплових колекторів у поєднанні з тепловим насосом дозволяє підвищити сезонний COP системи на 20–40% порівняно з автономним тепловим насосом, залежно від кліматичних умов та частки покриття сонячною енергією.

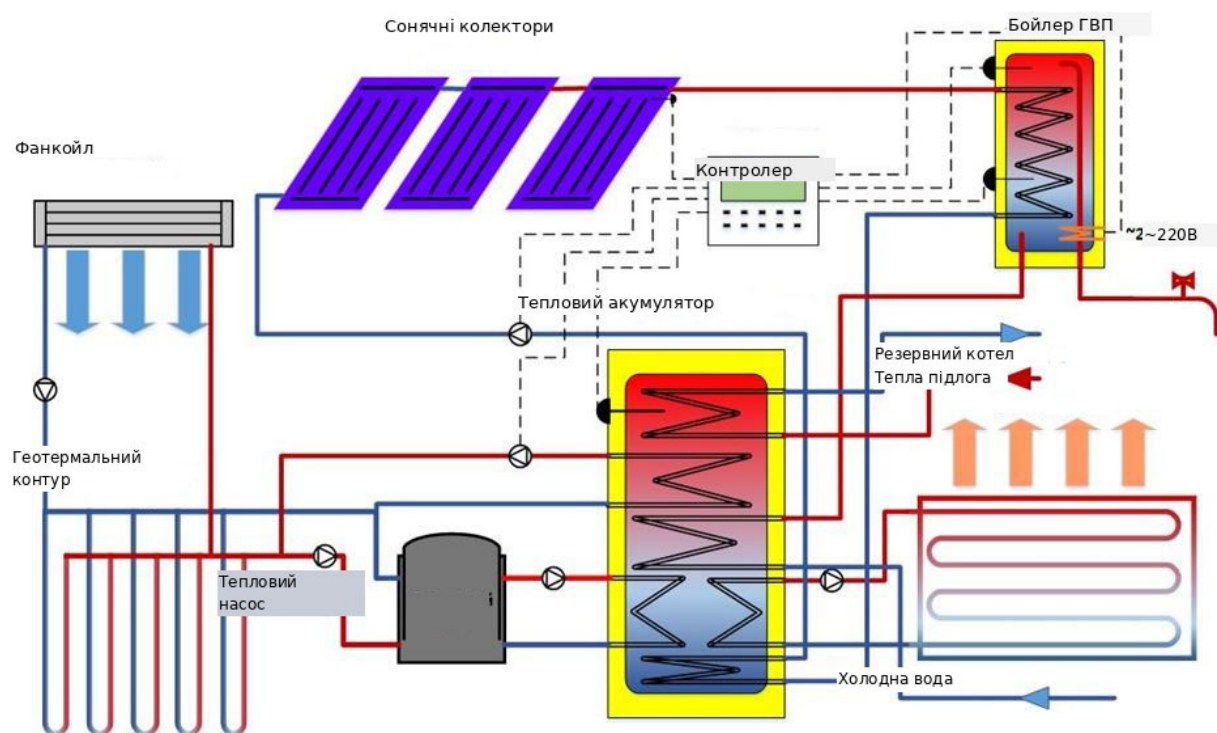


Рисунок 1.14- Система опалення з тепловим насосом та сонячними колекторами

Поєднання теплового насоса з фотоелектричними панелями реалізує принципово інший підхід, за якого відновлювана енергія використовується не у тепловій, а в електричній формі для живлення компресора та допоміжного обладнання системи. Така схема набуває особливої актуальності в контексті зростання частки електрогенерації з відновлюваних джерел та розвитку концепції «розумного будинку». Основним ефектом від такої інтеграції є суттєве зниження операційних витрат на електроенергію, оскільки при достатній генерації фотоелектричної системи в денний час вартість виробленого тепла наближається до нуля.

Схема інтеграції включає фотоелектричні панелі, інвертор для перетворення постійного струму у змінний, акумуляторні батареї для накопичення надлишкової електроенергії, систему управління енергопотоками, тепловий насос з інверторним компресором та буферну ємність для акумулювання теплової енергії. Система управління енергопотоками відіграє ключову роль у такій схемі - вона визначає оптимальний режим роботи теплового насоса залежно від поточного рівня генерації фотоелектричних панелей, стану акумуляторних батарей, тарифів на електроенергію та теплового навантаження будівлі. При надлишковій генерації сонячної електроенергії система може активувати режим інтенсивного накопичення тепла у буферній ємності — так звану стратегію теплового акумулювання. Дослідження показують, що при правильно спроектованій системі управління частка самоспоживання електроенергії від фотоелектричних панелей може досягати 60–80%, що дозволяє значно знизити залежність від зовнішньої електромережі та зменшити викиди CO<sub>2</sub> на 50–70% порівняно з традиційними газовими котлами.

Геотермальні теплові насоси є одним із найбільш ефективних варіантів використання відновлюваної теплової енергії, де джерелом низькопотенційного тепла слугує енергія ґрунту з відносно стабільною температурою від +8°C до +12°C на глибині понад 10 м для кліматичних умов України. Геотермальні системи поділяються на два основних типи:

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

горизонтальні колектори, що розташовуються на глибині 1,2–2,0 м та потребують значної площі земельної ділянки, і вертикальні зонди, що буряться на глибину від 50 до 150 м і забезпечують доступ до стабільніших температурних умов. Незважаючи на вищу вартість буріння, вертикальні зонди забезпечують вищий та стабільніший COP системи протягом усього опалювального сезону. Для геотермальних систем характерні найвищі значення сезонного коефіцієнта ефективності серед усіх типів теплових насосів — SCOP від 3,5 до 5,0, що робить їх економічно привабливими в довгостроковій перспективі, незважаючи на значні початкові капіталовкладення.

Найбільш перспективним напрямом є створення комплексних гібридних систем, у яких тепловий насос інтегрується одночасно з кількома відновлюваними джерелами енергії. Такі системи поєднують переваги кожного джерела та компенсують їхні недоліки за рахунок взаємодоповнення, включаючи геотермальний тепловий насос як основне джерело тепла, сонячні теплові колектори для підвищення температури теплоносія у перехідний сезон, фотоелектричні панелі для покриття електроспоживання компресора, а також буферні ємності та акумуляторні батареї для теплового і електричного акумулювання відповідно. Ефективне функціонування такої системи можливе лише за наявності інтелектуальної системи управління, що реалізує оптимізаційні алгоритми розподілу навантаження між джерелами.

Сучасні системи управління на базі програмованих логічних контролерів та SCADA дозволяють у реальному часі аналізувати стан усіх компонентів, прогнозувати теплове навантаження будівлі та генерацію відновлюваної енергії, приймаючи оптимальні рішення щодо режимів роботи кожного джерела. Впровадження таких інтелектуальних систем керування дозволяє знизити загальне енергоспоживання на 15–30% порівняно з традиційними підходами до управління.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 30   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

Проектування та «експлуатація систем інтеграції теплових насосів з відновлюваними джерелами енергії регулюється рядом міжнародних та національних нормативних документів. На рівні Європейського Союзу ключовими є директива щодо відновлюваних джерел енергії RED II (2018/2001/EU), а також стандарти серії EN 14511, що визначають методологію вимірювання та розрахунку ефективності теплових насосів. Для геотермальних систем застосовуються стандарти EN ISO 13256, а для оцінки сезонної ефективності — EN 14825. В Україні нормативну базу складають ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», а також ряд технічних умов та регламентів у сфері енергоефективності будівель» [11].

Таким чином, результати проведеного дослідження свідчать про те, що інтеграція теплових насосів з відновлюваними джерелами енергії є технічно обґрунтованим та економічно доцільним рішенням для сучасних систем теплопостачання. Застосування сонячних теплових колекторів підвищує сезонний COP на 20–40%, поєднання з фотоелектричними панелями забезпечує самоспоживання електроенергії до 60–80%, а геотермальні системи демонструють найвищі значення SCOP у діапазоні 3,5–5,0. Найбільш перспективними є комплексні гібридні системи з кількома відновлюваними джерелами, ефективна робота яких можлива виключно за умови впровадження інтелектуальних систем управління. Зазначені рішення відповідають стратегічним пріоритетам енергетичної незалежності та декарбонізації як для України, так і для країн Європейського Союзу.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 31   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

## 2. ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

### 2.1 Аналіз теплових насосів для гібридної системи опалення

Тепловий насос типу «вода–вода» є термодинамічним пристроєм, що використовує низькопотенційну теплову енергію підземних або поверхневих водних джерел для забезпечення потреб у опаленні та гарячому водопостачанні. На відміну від систем «грунт–вода» та «повітря–вода», джерелом теплоти в даному типі насосів виступає рідке теплоносе середовище, що забезпечує стабільніші термодинамічні умови роботи впродовж опалювального сезону.

Принцип дії теплового насоса базується на зворотному циклі Карно. Холодоагент у випарнику поглинає теплоту від джерела (води свердловини, водойми або системи рекуперації), після чого компресор підвищує тиск і температуру пари холодоагенту. У конденсаторі теплота передається до контуру опалення або ГВП, а після дроселювання в розширювальному вентилі холодоагент повертається до випарника, завершуючи цикл.

Термодинамічна ефективність «теплового насоса характеризується коефіцієнтом перетворення COP, що визначається як відношення виробленої теплової потужності до спожитої електричної потужності:

$$COP = Q_0 / W_{el} = (Q_0 + Q_e) / W_{el} \quad (2.1)$$

де  $Q_0$  — теплова потужність теплового насоса, кВт;  $Q_e$  — потужність, що поглинається від джерела тепла, кВт;  $W_{el}$  — споживана електрична потужність, кВт.

Теоретично максимальне значення COP обмежується ідеальним (оберненим) циклом Карно і визначається з виразу:

$$COP = T_k / (T_k - T_l) \quad (2.2)$$

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 32   |

де  $T_k$  — абсолютна температура конденсації (температура теплоносія на виході), К;  $T_l$  — абсолютна температура випаровування (температура джерела), К.

Реальний COP теплового насоса є нижчим від ідеального внаслідок незворотних втрат у компресорі, теплообмінниках та трубопроводах. Практичний COP становить 40–60% від теоретичного максимуму і залежить від температур джерела та споживача, технічних характеристик компресора та холодоагенту» [11].

Сегмент теплових насосів типу «вода–вода» у сучасних умовах характеризується значною різноманітністю технічних рішень та широким спектром пропозицій від провідних світових виробників. Найбільш помітні позиції на цьому ринку займають компанії Nibe (Швеція), Viessmann (Німеччина), Daikin (Японія) та Vaillant (Німеччина), які формують основні тенденції розвитку галузі завдяки впровадженню енергоефективних технологій, інноваційних холодоагентів та інтелектуальних систем керування.

З метою виконання обґрунтованого порівняльного аналізу технічних та експлуатаційних характеристик було відібрано чотири репрезентативні моделі теплових насосів, що належать до діапазону теплової потужності 10–15 кВт. Вказаний інтервал потужностей є типовим для забезпечення систем опалення та гарячого водопостачання (ГВП) індивідуальних житлових будинків площею приблизно 150–250 м<sup>2</sup>, що відповідає умовам малоповерхової забудови в кліматичних умовах України.

Інверторний тепловий насос NIBE F1155 (рисунок 2.1) «номінальною тепловою потужністю 12 кВт (з живленням від трифазної мережі 380 В) є сучасним високотехнологічним рішенням для побудови енергоефективних систем опалення та гарячого водопостачання у житлових і малих комерційних об'єктах. Конструктивною особливістю даної моделі є використання інверторного компресора, що забезпечує безперервне регулювання продуктивності в широкому діапазоні залежно від поточного

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 33   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

теплого навантаження. Такий підхід дозволяє уникнути циклічних пусків і зупинок, характерних для традиційних систем, що, у свою чергу, знижує зношування обладнання, підвищує його ресурс та забезпечує стабільність теплопостачання.



Рисунок 2.1- Інверторний тепловий насос NIBE F1155

Інтелектуальна система керування, реалізована у насосах серії F1155/F1255, здійснює автоматичну адаптацію режимів роботи до змін зовнішніх температурних умов та внутрішніх теплових потреб будівлі протягом усього року. Це дозволяє досягти високого рівня енергетичної ефективності та мінімізувати експлуатаційні витрати на опалення і приготування гарячої води. Додатково, застосування циркуляційних насосів зі змінною частотою обертання та класом енергоефективності «А» сприяє оптимізації гідравлічних режимів системи та зменшенню споживання електроенергії» [13].

Важливою перевагою даного обладнання є широкий діапазон модуляції теплової потужності (приблизно від 1,5 до 6 кВт або від 4 до 16 кВт залежно від модифікації), що дозволяє ефективно працювати як у перехідні періоди, так і при пікових навантаженнях. Максимальна температура теплоносія на виході з конденсатора досягає близько 63 °С, що забезпечує сумісність із традиційними радіаторними системами опалення без необхідності їх модернізації.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

Система оснащена сучасним інтерфейсом користувача з кольоровим дисплеєм, що забезпечує зручність налаштування та моніторингу параметрів роботи. Крім того, передбачено можливість дистанційного керування та контролю через мобільні засоби зв'язку (зокрема, за допомогою модуля NIBE SMS 40) та інтеграцію в мережеві системи моніторингу через Інтернет. Підтримка протоколу Modbus (модуль NIBE MODBUS 40) дозволяє інтегрувати тепловий насос у комплексні системи автоматизації типу «розумний будинок».

Функціональні можливості системи можуть бути розширені шляхом підключення додаткових модулів, зокрема вентиляційних установок з рекуперацією тепла (NIBE FLM) або систем пасивного та активного охолодження (NIBE PCS/PCM/HPAC), що забезпечує багатофункціональність і можливість використання обладнання протягом усього року.

З технічної точки зору, насос характеризується високими показниками енергоефективності: коефіцієнт перетворення енергії (COP) становить близько 4,8 за стандартних умов B0/W35 відповідно до EN 14511, тоді як сезонний коефіцієнт ефективності (SCOP) сягає приблизно 5,5 відповідно до EN 14825. Це свідчить про високий рівень ефективності використання первинної енергії. Інверторна технологія також забезпечує зменшення пускових струмів, що знижує навантаження на електромережу та підвищує надійність електроживлення.

Конструкція теплового насоса передбачає наявність функції «плавного пуску» компресора, а також модульну будову з висувним компресорним блоком, що спрощує транспортування, монтаж і технічне обслуговування. У модифікації F1255 додатково інтегровано накопичувальний бак гарячої води об'ємом близько 180 л, що підвищує автономність системи гарячого водопостачання.

Акустичні характеристики установки відповідають високим стандартам комфорту: рівень звукового тиску становить близько 27 дБ(А) (за умов

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 35   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

В0/W35 на відстані 1 м), що дозволяє встановлювати обладнання у безпосередній близькості до житлових приміщень. Додатково передбачено вбудований електричний нагрівач ступеневого типу потужністю до 9 кВт, який використовується як резервне або пікове джерело тепла у бівалентних схемах.

Таким чином, тепловий насос NIBE F1155 є комплексним інженерним рішенням, що поєднує високу енергоефективність, адаптивність до змінних умов експлуатації, широкі можливості інтеграції та високий рівень комфорту, що робить його доцільним для застосування у сучасних енергоощадних системах теплопостачання.

Тепловий насос Viessmann Vitocal 300-G (рисунок 2.2) «є високоефективним інженерним рішенням класу «розсіл–вода» з можливістю реалізації схем типу «вода–вода» через проміжний контур теплоносія. Дана установка орієнтована як на нове будівництво, так і на модернізацію існуючих систем теплопостачання, забезпечуючи стабільне теплопостачання, гаряче водопостачання та, за необхідності, функцію охолодження приміщень.



Рисунок 2.2- Тепловий насос Viessmann Vitocal 300-G

Ключовою конструктивною особливістю Vitocal 300-G є використання інверторної технології керування компресором, що дозволяє здійснювати плавне регулювання теплової потужності відповідно до фактичного теплового навантаження об'єкта. Завдяки цьому забезпечується мінімізація кількості циклів «пуск–зупинка», що позитивно впливає на

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 36   |

енергоефективність, надійність і довговічність обладнання. Діапазон модуляції потужності залежно від типорозміру становить приблизно від 1,7 до 15,9 кВт, що дозволяє гнучко адаптувати систему до змінних умов експлуатації.

Високий рівень енергетичної ефективності теплового насоса досягається завдяки застосуванню інноваційної системи керування холодильним циклом RCD (Refrigerant Cycle Diagnostic), яка у поєднанні з електронним розширювальним клапаном забезпечує точне регулювання параметрів холодоагенту в реальному часі. Це дозволяє оптимізувати процес теплообміну в кожній робочій точці та досягати коефіцієнта перетворення (COP) на рівні до 4,7–5,0 за стандартних умов B0/W35 відповідно до EN 14511. Сезонний коефіцієнт ефективності (SCOP) може досягати значень до 5,6, що свідчить про високий рівень річної енергоефективності системи.

Однією з важливих переваг Vitocal 300-G є універсальність застосування. Система може працювати як у режимі опалення, так і в режимі активного або пасивного охолодження, що розширює її функціональність упродовж року. Максимальна температура теплоносія на виході досягає близько 60 °C, що забезпечує сумісність як з низькотемпературними системами (тепла підлога), так і з традиційними радіаторними системами опалення» [12].

Тепловий насос Daikin EWAQ014BAWP (рисунок 2.3) є представником високоефективних інверторних систем компанії Daikin, орієнтованих на застосування у сучасних системах тепlopостачання та холодопостачання. Дана установка конструктивно реалізована на базі інверторного спірального компресора (scroll compressor), що забезпечує плавне регулювання продуктивності та високу стабільність роботи в умовах змінного теплового навантаження.

Ключовою особливістю моделі EWAQ014BAWP є «використання інверторної технології, яка дозволяє безперервно адаптувати частоту обертання компресора відповідно до поточних потреб системи. Це сприяє

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 37   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

суттєвому зниженню енергоспоживання, оскільки мінімізується кількість енергоємних пускових режимів і забезпечується робота у режимі часткового навантаження, що є типовим для більшості часу експлуатації теплових насосів. Згідно з технічними характеристиками аналогічних систем Daikin, така технологія дозволяє зменшити витрати електроенергії до 30% порівняно з традиційними неінверторними установками.



Рисунок 2.3- Тепловий насос Daikin EWAQ014BWP

Тепловий насос характеризується широким діапазоном робочих режимів і може ефективно використовуватись як для опалення, так і для охолодження приміщень, що робить його універсальним рішенням для цілорічної експлуатації. Завдяки інтегрованій гідравлічній частині (hydronic module) установка може бути безпосередньо підключена до систем водяного опалення без необхідності використання додаткових буферних ємностей у стандартних схемах» [13].

З точки зору енергоефективності, установки даного типу демонструють високі значення коефіцієнта перетворення (COP), особливо у режимах часткового навантаження, що є типовими для реальних умов експлуатації. Висока часткова ефективність (part-load efficiency) дозволяє суттєво знизити

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 38   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

експлуатаційні витрати, що є одним із ключових критеріїв при виборі теплового насоса для індивідуальних і комерційних об'єктів.

Додатковою перевагою системи є зменшені пускові струми, що знижує навантаження на електромережу та підвищує стабільність роботи всієї енергосистеми будівлі. Це особливо важливо для об'єктів із обмеженими можливостями електроживлення або при інтеграції з відновлюваними джерелами енергії.

Конструкція теплового насоса «передбачає можливість роботи у широкому діапазоні температур зовнішнього середовища, що забезпечує його адаптацію до різних кліматичних умов. Крім того, система може інтегруватися у складні інженерні рішення, включаючи гібридні системи тепlopостачання, системи «розумного будинку» та централізовані системи керування будівлею (BMS).

Таким чином, тепловий насос Daikin EWAQ014BAWP є сучасним енергоефективним рішенням, що поєднує інверторне регулювання, високу надійність спірального компресора, універсальність застосування та можливість інтеграції у складні інженерні системи. Його використання є доцільним для побудови сучасних систем опалення та охолодження з підвищеними вимогами до енергоефективності та експлуатаційної надійності» [14].

Тепловий насос Vaillant geoTHERM VWS 61/3 (рисунок 2.4) є представником геотермальних систем типу «вода–вода», що використовують теплову енергію ґрунту як низькопотенційне джерело. Дана установка призначена для забезпечення систем опалення та гарячого водопостачання житлових і малих комерційних будівель, характеризуючись високою надійністю, стабільністю роботи та енергоефективністю.

Конструкція теплового насоса передбачає використання високоефективного спірального (scroll) компресора, який характеризується низьким рівнем вібрацій, високою довговічністю та стабільною роботою у широкому діапазоні навантажень. Додатково система оснащена вбудованими

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 39   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

циркуляційними насосами як у контурі джерела тепла, так і в контурі опалення, що дозволяє спростити гідравлічну інтеграцію установки у систему теплопостачання.



Рисунок 2.4- Vaillant geoTHERM VWS 61/3

Важливою особливістю geoTHERM VWS 61/3 є наявність погодозалежного регулювання, яке автоматично коригує температуру теплоносія залежно від зовнішніх кліматичних умов. Це забезпечує оптимізацію енергоспоживання та підвищення комфортності мікроклімату в приміщеннях. Крім того, система підтримує функцію дистанційного моніторингу та діагностики через сервіс vnetDIALOG, що дозволяє здійснювати контроль параметрів роботи у режимі реального часу .

З точки зору експлуатаційних характеристик, установка відзначається порівняно низьким рівнем шуму (приблизно 46 дБ(А)), що досягається завдяки застосуванню багатошарової шумоізоляції корпусу. Компактне виконання та можливість гнучкого підключення трубопроводів (зверху або ззаду) значно спрощують монтаж і технічне обслуговування.

Додатково передбачено можливість інтеграції системи пасивного охолодження, при якому надлишкове тепло з приміщень відводиться у ґрунт без використання компресора, що дозволяє значно знизити енергоспоживання у літній період. Це розширює функціональні можливості теплового насоса та підвищує його універсальність.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

Таким чином, тепловий насос Vaillant geoTHERM VWS 61/3 є ефективним та надійним рішенням для систем теплопостачання, яке поєднує використання відновлюваних джерел енергії, високі показники енергоефективності, розвинуті засоби автоматизації та можливість інтеграції у сучасні інженерні системи будівель. Його застосування є доцільним у складі енергоощадних та гібридних систем опалення з урахуванням вимог до комфорту, економічності та екологічності.

Порівняльна характеристика технічних параметрів досліджуваних теплових насосів наведена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Технічні характеристики досліджуваних теплових насосів типу «вода–вода»

| Параметр                   | Nibe<br>F1155-12 | Viessmann<br>Vitocal<br>300-G | Daikin<br>EWAQ014BAWP | Vaillant<br>geoTHERM<br>VWS 61/3 |
|----------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Теплова потужність, кВт    | 12,0             | 11,0                          | 14,0                  | 10,2                             |
| Електрична потужність, кВт | 2,55             | 2,40                          | 3,10                  | 2,25                             |
| COP (B10/W35)              | 4,70             | 4,60                          | 4,51                  | 4,53                             |
| COP (B0/W35)               | 4,30             | 4,10                          | 4,12                  | 4,20                             |
| SCOP (сезонний)            | 5,10             | 4,95                          | 4,78                  | 4,88                             |
| Темп. подачі, макс. °C     | 65               | 65                            | 60                    | 65                               |
| Витрата теплоносія, м³/год | 1,8–3,2          | 1,6–3,0                       | 2,0–3,5               | 1,5–2,8                          |
| Рівень шуму, дБ(А)         | 45               | 46                            | 48                    | 44                               |
| Холодоагент                | R410A            | R410A                         | R32                   | R410A                            |
| Маса, кг                   | 135              | 148                           | 162                   | 124                              |
| Орієнтовна ціна, тис. грн. | 185–210          | 175–200                       | 160–185               | 170–195                          |

Аналіз даних таблиці 2.1 свідчить про те, що найвищий коефіцієнт перетворення у стандартних умовах (B10/W35) демонструє Nibe F1155-12 ( $COP = 4,70$ ), що обумовлено застосуванням двоступеневого компресора зі змінною частотою обертання (інверторного типу). Модель Daikin EWAQ014BAWP має найбільшу номінальну теплову потужність (14,0 кВт), що забезпечує її застосування для об'єктів з підвищеними тепловими навантаженнями. Слід зазначити, що використання холодоагенту R32 (Daikin) дозволяє знизити потенціал глобального потепління (GWP) приблизно у три рази порівняно з R410A.

На рисунку 2.5 представлено залежність  $COP$  від температури джерела тепла для всіх досліджуваних моделей, розраховану на підставі кривих продуктивності з технічної документації виробників та наближену поліноміальними функціями за методом найменших квадратів.

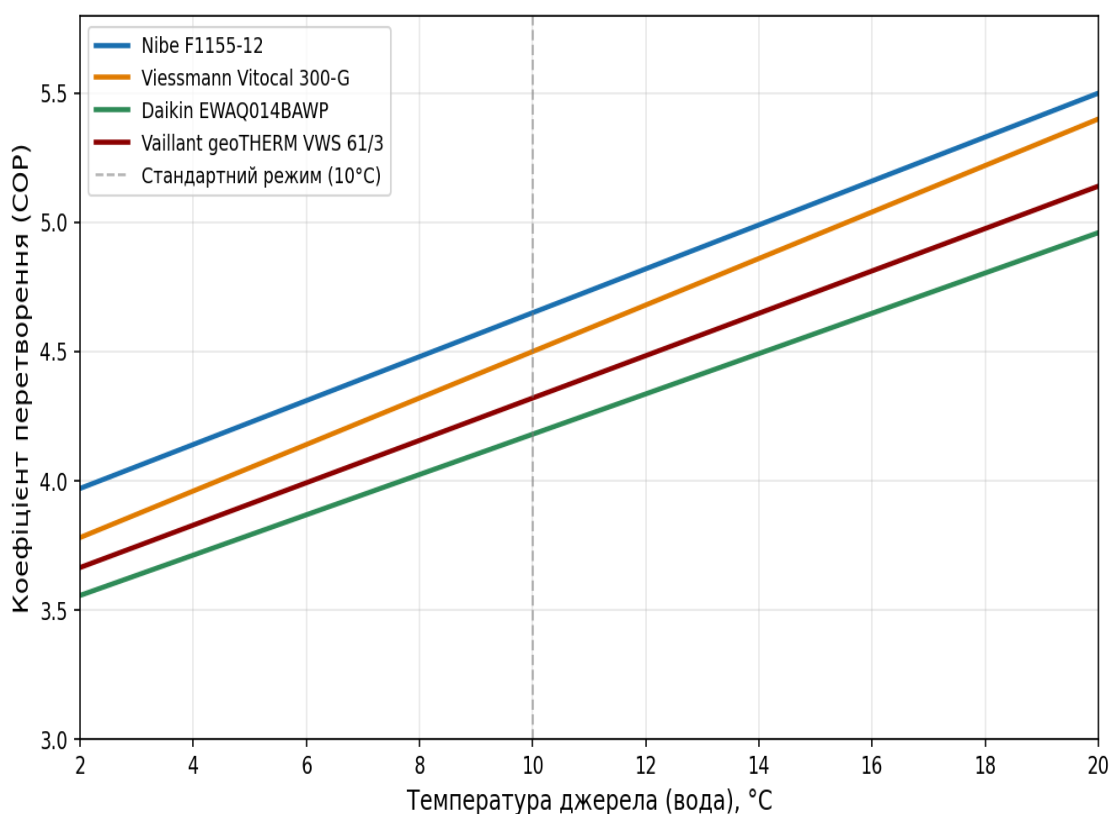


Рисунок. 2.5. Залежність  $COP$  теплових насосів типу «вода–вода» від температури джерела тепла

З графіку видно, що зі збільшенням температури джерела на  $1^{\circ}C$  коефіцієнт перетворення зростає в середньому на 0,08–0,09 одиниць. Це

підтверджує доцільність застосування свердловинних систем водозабору, що забезпечують стабільну температуру 8–12°C впродовж всього року, на відміну від поверхневих водойм, температура яких суттєво коливається в залежності від сезону.

## 2.2 Аналіз компонентів системи гібридного теплозабезпечення на основі теплового насосу

Гібридна система опалення та гарячого водопостачання (ГВП), являє собою комплексне інженерне рішення, що поєднує декілька джерел теплової енергії, акумулюючі ємності, гідравлічні розподільчі вузли та теплоспоживальні контури. Концептуальною основою побудови такої системи є принцип багатоджерельного тепlopостачання (multi-source heat supply), що дозволяє поєднувати переваги кожного з доступних джерел енергії, компенсуючи їх індивідуальні недоліки.

Архітектуру системи можна розглядати як трирівневу ієрархічну структуру (рисунк 2.6). Перший рівень охоплює джерела генерації теплоти: газовий котел, твердопаливний котел та геліосистему на базі плоских сонячних колекторів. Другий рівень складають вузли акумулювання та гідравлічного розподілу: буферна ємність (теплоаккумулятор) і гідравлічна стрілка. Третій рівень представлений споживачами теплової енергії: контурами радіаторного опалення, теплої підлоги та гарячого водопостачання, реалізованими через насосно-змішувальні групи Meibes. Взаємодія між рівнями ієрархії забезпечується за рахунок автоматизованої системи керування, яка здійснює моніторинг параметрів теплоносія та координацію роботи виконавчих механізмів у режимі реального часу.

Основними технічними перевагами такої архітектури є: забезпечення енергетичної гнучкості за рахунок можливості перемикання між джерелами теплоти залежно від їх поточної ефективності та доступності палива; підвищення надійності тепlopостачання завдяки взаємному резервуванню

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 43   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

джерел; оптимізація сезонних витрат на теплову енергію шляхом пріоритизації відновлюваних джерел у теплі пори року; суттєве зниження питомих викидів CO<sub>2</sub> порівняно з моноджерельними системами на викопному паливі.



Рисунок 2.6-Трирівнева гібридна система опалення

Геліосистема є «відновлюваною складовою гібридної системи та призначена для утилізації енергії сонячного випромінювання з метою нагріву теплоносія. Плоский сонячний колектор (рисунок 2.7) являє собою теплоізований корпус із прозорим покриттям (низькозалістисте скло з коефіцієнтом пропускання  $\tau \geq 0,92$ ) та поглиначем (абсорбером) з нанесеним селективним покриттям, що характеризується коефіцієнтом поглинання  $\alpha \geq 0,95$  та коефіцієнтом теплового випромінювання  $\epsilon \leq 0,05$ .

Теплова потужність колектора описується рівнянням Хоттеля–Вілльє–Блісса:

$$Q_k = A_k [FP(\tau\alpha)G - FPU_L(T_{ex} - T_{нав})]$$

де  $A_k$  — апертурна площа колектора, м<sup>2</sup>;

$FP$  — фактор вилучення теплоти колектора;

$(\tau\alpha)$  — ефективний добуток прозорості та поглинання;

$G$  — питома потужність сонячного випромінювання, Вт/м<sup>2</sup>;

$U_L$  — загальний коефіцієнт теплових втрат колектора, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$T_{вх}$  та  $T_{нав}$  — температури вхідного теплоносія та навколишнього середовища відповідно, °C» [16].



Рисунок 2.7- Сонячний колектор

Теплоносієм у сонячному контурі — суміш пропіленгліколю з водою концентрацією 30–40 % (для захисту від замерзання при температурах до –20°C). Циркуляція в контурі здійснюється насосом, керованим диференціальним термостатом: насос вмикається, коли температура в колекторі перевищує температуру нижньої зони бака-акумулятора на задане значення  $\Delta T_{вкл}$  (як правило, 5–8°C), і вимикається при зменшенні різниці до  $\Delta T_{викл}$  (1–3°C).

Для кліматичних «умов України середнє річне надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню становить 1150–1350 кВт·год/м<sup>2</sup>, а на похилу поверхню при оптимальному куті нахилу (30–45° залежно від широти місцевості) — 1250—1500 кВт·год/м<sup>2</sup>. Геліосистема з площею колекторів 4–8 м<sup>2</sup> здатна забезпечити 40–70 % річної потреби у тепловій енергії для ГВП» [17].

Буферна ємність (теплоакумулятор) (рисунок 2.8) є центральним вузлом акумулювання та перерозподілу теплової енергії у гібридній системі.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 45   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

Вона являє собою сталеву вертикальну ємність із тепловою ізоляцією (мінеральна вата або пінополіуретан завтовшки 80–120 мм), оснащену кількома патрубками для підключення різних джерел і споживачів, а також занурними теплообмінниками для інтеграції з контурами, що не допускають змішування теплоносіїв[18-19].



Рисунок 2.8- Теплоаккумулятор

Буферна ємність «виконує низку взаємопов'язаних функцій, що визначають її ключову роль у системі. По-перше, вона здійснює акумулювання надлишкової теплової енергії, виробленої джерелами у моменти, коли вироблення перевищує поточне споживання. По-друге, акумулятор забезпечує згладжування пікових теплових навантажень: при різкому зростанні теплового запиту від споживачів він віддає раніше накопичену теплоту, знімаючи пікове навантаження з котлового обладнання. По-третє, акумулятор виконує функцію гідравлічного розділення первинного (котлового) та вторинних (споживчих) контурів, що дозволяє їм функціонувати з різними витратами теплоносія без взаємного гідравлічного впливу. По-четверте, ємність забезпечує збільшення мінімального часу роботи котлів між циклами вмикання/вимикання, що особливо важливо для твердопаливних котлів і котлів з конденсаційним режимом роботи.

Ефективність буферної ємності суттєво залежить від організації температурної стратифікації теплоносія. Внаслідок різниці густини гарячіший теплоносій природно розміщується у верхній частині бака,

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 46   |

холодніший — у нижній. Коефіцієнт стратифікації характеризує якість теплового розшарування: для добре спроектованих ємностей він наближається до одиниці, що відповідає чіткому розподілу на теплу та холодну зони без перемішування.

З огляду на стратифікацію, підключення трубопроводів виконується відповідно до температурного рівня кожного контуру. Подача від котлів (висока температура) підключається до верхніх патрубків, подача до ГВП та радіаторного контуру — з верхньої або середньої зони, подача до контуру теплої підлоги — з середньої зони, зворотний теплоносій від усіх споживачів — до нижніх патрубків. Теплообмінник сонячного контуру, що нагріває теплоносій при порівняно невисоких температурах (40–80°C), розміщується у нижній частині ємності, де він отримує максимальну різницю температур для ефективної передачі теплоти [20].

Накопичувальний бак «гарячої води (бойлер непрямого нагріву) (рисунки 2.9) призначений для приготування санітарної гарячої води для господарсько-побутових потреб і є окремим елементом системи, що функціонально пов'язаний як з контуром опалення, так і з геліосистемою. Конструктивно бак являє собою теплоізовльовану ємність об'ємом від 150 до 500 л (залежно від кількості мешканців та пікового водоспоживання), всередині якої розміщено один або два змієвикові теплообмінники.

Нижній змієвик призначений для нагріву від геліосистеми: він отримує теплоту при відносно низьких температурах теплоносія (від 40°C), забезпечуючи попереднє нагрівання води та максимальне використання сонячної енергії. Верхній змієвик підключений до контуру опалення або котла і виконує роль догрівача до заданої санітарної температури (зазвичай 55–60°C). Така двоступенева схема нагріву дозволяє досягти часткового покриття потреби в ГВП за рахунок відновлюваних джерел навіть у хмарну погоду» [21].

Важливою умовою безпечної експлуатації баку ГВП є запобігання розмноженню бактерій *Legionella pneumophila*, що активно розмножуються

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 47   |

при температурі 30–45°C. З цією метою передбачено термічну дезінфекцію (функція anti-Legionella): один раз на тиждень автоматика підвищує температуру у баку до 70°C і підтримує її протягом 30–60 хвилин. Паралельно для запобігання корозії бак оснащується магнієвим анодом, стан якого необхідно контролювати щороку в рамках планового технічного обслуговування[22].



Рисунок 2.9- Накопичувальний бак гарячої води

Гідравлічна стрілка (гідрострілка, термогідравлічний роздільник) є «спеціалізованим гідравлічним пристроєм, що забезпечує ефективну гідравлічну розв'язку між первинним (котловим) і вторинними (споживчими) контурами циркуляції теплоносія. Конструктивно вона являє собою вертикальний циліндр або прямокутний корпус із чотирма патрубками, внутрішній перетин якого суттєво перевищує перетин підключених трубопроводів. Завдяки цьому швидкість теплоносія всередині гідрострілки є мінімальною (зазвичай менше 0,1 м/с), що практично виключає передачу динамічного тиску між контурами» [23].

Принцип дії гідро стрілки (рисунок 2.10) «базується на концепції так званого "нульового диференційного тиску" між первинним і вторинним контурами у точці підключення. Оскільки швидкість теплоносія у порожнині гідрострілки близька до нуля, перепад тиску між верхніми та нижніми патрубками практично відсутній. Це означає, що насос первинного контуру

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 48   |

(котловий) і насоси вторинних контурів (споживачі) працюють незалежно, не впливаючи один на одного. Можливі три режими балансу витрат:

Перший режим — витрата первинного контуру дорівнює сумарній витраті вторинних ( $G_{\text{пр}} = \Sigma G_{\text{втор}}$ ): теплоносій переходить з первинного у вторинний контур повністю, температура подачі у вторинних контурах дорівнює температурі подачі первинного» [24].

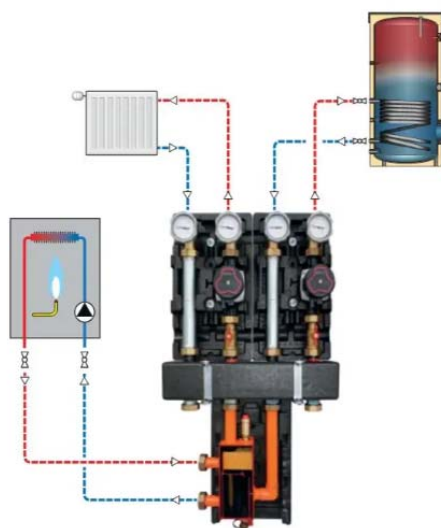


Рисунок 2.10- Гідрострілка

Другий режим — витрата первинного контуру перевищує сумарну витрату вторинних ( $G_{\text{пр}} > \Sigma G_{\text{втор}}$ ): надлишок теплоносія з подачі первинного контуру перетікає вниз у зворотний трубопровід первинного контуру, що призводить до незначного підвищення температури у зворотному теплоносії котла.

Третій режим — витрата первинного контуру менша від сумарної витрати вторинних ( $G_{\text{пр}} < \Sigma G_{\text{втор}}$ ): для компенсації дефіциту витрати у вторинні контури підмішується частина зворотного теплоносія, що спричиняє зниження температури подачі у вторинному колекторі [25].

Сучасні термогідрравлічні роздільники, крім функції гідравлічної розв'язки, можуть виконувати функцію видалення розчиненого повітря та шламу з теплоносія. Для цього у верхній частині корпусу встановлюється автоматичний повітровідвідник, а у нижній - пробка для видалення осаду. Деякі виробники пропонують комбіновані пристрої - гідравлічні сепаратори

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 49   |

(наприклад, Spirovent Micro Bubble, Caleffi Discal), що поєднують функції гідрострілки, деаератора та шламовіддільника в одному корпусі. Застосування таких пристроїв суттєво знижує ризик кавітації та ерозії в циркуляційних насосах, а також подовжує строк служби теплообмінних поверхонь за рахунок зниження вмісту кисню в теплоносії.

Насосно-змішувальні модулі компанії Meibes (Meibes System-Technik GmbH) (рисунок 2.11) «представляють собою заводськи зібрані функціональні блоки, що реалізують подачу теплоносія до окремих контурів споживання з можливістю регулювання температурного рівня. Застосування готових модулів суттєво скорочує трудомісткість монтажних робіт, мінімізує кількість з'єднань та підвищує надійність системи» [26].



Рисунок 2.11- Насосно-змішувальні модулі

До складу стандартної насосно-змішувальної групи входять: циркуляційний насос (клас енергоефективності А за ЕгР-директивою) з частотним регулюванням; триходовий або чотириходовий змішувальний клапан з електросервоприводом; запірна арматура (кульові крани) на подачі та зворотному трубопроводі; термометри у патрубках подачі та зворотного трубопроводу; ручний балансувальний клапан для гідравлічного налагодження; кронштейн або консольна рамка для монтажу на колекторному вузлі.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 50   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

Функція змішування реалізується трьохходовим клапаном, що змішує гарячий теплоносій з подачі колектора та охолоджений теплоносій зі зворотного трубопроводу відповідного контуру у заданій пропорції. Таким чином температура подачі у контур підтримується на заданому рівні незалежно від температури теплоносія у первинному колекторі. Це є принципово важливим для контуру теплої підлоги, де максимально допустима температура подачі становить 45–50°C (обмеження за умовами санітарних норм та захисту оздоблення підлоги), тоді як у первинному колекторі температура може досягати 80–90°C.

Сучасні насосно-змішувальні групи Meibes інтегруються з контролерами погодозалежного регулювання, що реалізують алгоритм корекції температури теплоносія залежно від поточної температури зовнішнього повітря. Графік нагрівання (опалювальний графік) описує залежність температури подачі  $T_p$  від температури зовнішнього повітря  $T_n$  у вигляді лінійної функції:

$$T_p = T_{\text{прозр}} + k \cdot (T_{\text{розр}} - T_n)$$

де  $T_{\text{прозр}}$  - розрахункова температура подачі при розрахунковій температурі зовнішнього повітря;  $k$  - кутовий коефіцієнт графіка нагрівання (крутизна), що характеризує тепловтрати будівлі та тип системи опалення;  $T_{\text{розр}}$  - розрахункова температура зовнішнього повітря для даного регіону, °C. Погодозалежне регулювання дозволяє досягти економії від 10 до 20 % витрат на опалення порівняно із системами без такого регулювання.

Система реалізує паралельне підключення кількох теплоспоживальних контурів, кожен з яких обслуговується власною насосно-змішувальною групою і характеризується індивідуальними вимогами до температурного рівня та витрати теплоносія.

Радіаторний контур є високотемпературним і передбачає температурний графік 75/65°C або 70/55°C (подача/зворот). Радіаторне опалення відрізняється простотою монтажу, можливістю точкового регулювання за допомогою термостатичних головок та відносно швидкою

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 51   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

реакцією на зміну теплового навантаження. Інерційність такої системи є невисокою, що дозволяє ефективно реагувати на зміни теплопритоків від сонця та вентиляції.

Контур теплої підлоги є низькотемпературним із заданим температурним графіком не вище 45/35°C. Висока теплова інерційність системи водяної теплої підлоги обумовлює необхідність застосування погодозалежного регулювання та коригуючих алгоритмів, що враховують масу бетонної стяжки. Водночас тепла підлога забезпечує найбільш комфортний характер теплообміну з точки зору людини, оскільки температура підлоги лише на 2–4°C вища від температури повітря у приміщенні.

Контур ГВП є пріоритетним з точки зору санітарних вимог: температура гарячої води на виведенні не повинна опускатися нижче 55°C для запобігання росту легіонел. У системі з рециркуляцією ГВП забезпечується постійна циркуляція гарячої води у трубопроводі розведення, що гарантує миттєву подачу гарячої води у точки водорозбору без попереднього зливання холодної.

Для компенсації теплового розширення теплоносія у закритих системах застосовуються мембранні розширювальні баки (рисунок 2.12) (МРБ). Принцип їх роботи полягає в тому, що при нагріванні теплоносіїв розширюється і надходить у рідинну камеру бака, стискаючи газ (азот або повітря) у газовій камері через еластичну мембрану. При охолодженні газ розширюється, виштовхуючи теплоносіїв назад у систему [27].



Рисунок 2.12- Мембранний розширювальний бак

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 52   |

Початковий тиск підкачки газу в МРБ (Рв) задається рівним статичному тиску стовпа рідини від бака до найвищої точки системи плюс мінімально допустимий надлишковий тиск (0,3–0,5 бар). Максимальний робочий тиск системи обмежується запобіжним клапаном, що настраюється на тиск 2,5–3,0 бар для типових систем опалення. Об'єм МРБ розраховується відповідно до стандарту EN 12828.

У сонячному контурі через підвищені температури теплоносія (до 150°C у режимі стагнації) застосовуються спеціальні розширювальні баки з підвищеним робочим тиском та термостійкою мембраною, виготовленою з EPDM або PTFE. Запобіжний клапан сонячного контуру настраюється на 6–8 бар. Для відведення пари при перегріві передбачено фазовий сепаратор та охолоджувальний радіатор.

До складу груп безпеки системи входять: запобіжні клапани на кожному контурі; манометри для контролю тиску; автоматичні повітровідвідники у верхніх точках контурів; фільтри-брудовловлювачі на зворотних трубопроводах котлів; зворотні клапани для запобігання небажаний природній циркуляції у неробочих контурах.

Проведений аналіз дозволяє зробити такі висновки. По-перше, застосування буферної ємності є обов'язковою умовою коректної роботи газового котла та ефективної інтеграції геліосистеми. Об'єм акумулятора повинен бути розрахований виходячи з потужності котла та тривалості одного циклу горіння. По-друге, гідравлічна стрілка забезпечує необхідну гідравлічну незалежність між первинним та вторинними контурами, що є необхідною умовою стабільної роботи насосного обладнання та точного регулювання температури у споживчих контурах. По-третє, насосно-змішувальні групи Meibes [28] реалізують ефективний розподіл теплової енергії між контурами з різними температурними вимогами, забезпечуючи незалежне регулювання кожного контуру. У підсумку, розглянута система є технічно обґрунтованим рішенням для теплопостачання будівлі із

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 53   |

застосуванням відновлюваних та традиційних джерел енергії, що задовольняє вимоги сучасних стандартів енергоефективності.

### 2.3 Аналіз пристроїв управління гібридною системою опалення на основі теплового насосу

Ефективність гібридної системи опалення на основі теплового насоса значною мірою визначається не лише параметрами теплогенераторів, а й якістю автоматизації. Саме контролер забезпечує погодозалежне регулювання, узгодження роботи теплового насоса з резервним джерелом теплоти, керування контурами опалення та гарячого водопостачання, а також дистанційний моніторинг і зміну режимів роботи. Для досліджуваної системи доцільно висунути такі вимоги до пристрою керування: підтримка теплового насоса і допоміжного джерела теплоти, робота щонайменше з двома контурами опалення, реалізація погодозалежного алгоритму, можливість розширення системи модулями, а також наявність віддаленого доступу зі смартфона або через веб-інтерфейс. На цій основі доцільно порівняти рішення кількох виробників, які застосовуються в сучасних системах опалення.

Серед таких пристроїв доцільно виділити Vaillant sensoCOMFORT VRC 720, Bosch CW 400, Buderus Logamatic RC310 та Viessmann Vitotronic 200. Вибір саме цих контролерів зумовлений тим, що всі вони належать до класу системних регуляторів, орієнтованих на складні багатоконтурні системи, підтримують погодозалежне керування і мають засоби дистанційного доступу. Водночас їх функціональні можливості, масштабованість і зручність інтеграції в гібридні схеми відрізняються, що дозволяє провести коректне технічне порівняння[29].

Контролер Vaillant sensoCOMFORT VRC 720 (рисунок 2.13) «позиціонується виробником як універсальний погодозалежний регулятор для всіх основних типів опалювальних систем: газових та електричних

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 54   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

котлів, теплових насосів, контурів опалення і ГВП, сонячних колекторів, фотогальванічних систем і вентиляції. Важливою перевагою цього рішення є можливість розширення функціоналу додатковими модулями, а також підтримка складних конфігурацій: у поєднанні з модулями VR 70/VR 71 система може керувати кількома контурами та каскадами обладнання. Для віддаленого керування застосовується інтернет-модуль myVAILLANT connect, що забезпечує моніторинг, зміну параметрів, сповіщення про помилки та інтеграцію через Wi-Fi. Окремо слід відзначити, що у матеріалах Vaillant прямо вказується придатність sensoCOMFORT для гібридних і відновлюваних систем, а також використання технології автоматичного вибору найбільш ефективного способу теплозабезпечення в гібридних конфігураціях» [30].



Рисунок 2.13- Контролер Vaillant sensoCOMFORT VRC 720

Контролер Bosch CW 400 (рисунок 2.14) також належить до класу розвинених погодозалежних регуляторів. За даними Bosch, він дозволяє керувати до чотирьох опалювальних контурів зі змішувачем або без нього, а також двома контурами гарячого водопостачання. Для дистанційного доступу використовується комунікаційний модуль ProControl Gateway або сучасний шлюз Connect-Key K 40 RF із застосунком HomeCom Easy. У документації Bosch зазначено, що K 40 RF підтримує віддалене керування та моніторинг системи і сумісний, зокрема, з гібридним пакетом Bosch hybrid manager у зв'язці з CW 400. Отже, це рішення є технічно сильним

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 55   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

кандидатом для багатоконтурних систем з тепловим насосом і додатковим джерелом теплоти.



Рисунок 2.14 Bosch CW 400

Система Buderus Logamatic RC310 (рисунок 2.15) є «близькою за класом до Bosch CW 400 і орієнтована на складні системи на шині EMS plus. За офіційними даними Buderus, у базовій комплектації RC310 керує одним контуром нагріву та контуром ГВП, а за рахунок модулів розширення може працювати з кількома контурами; в інструкції RC310 вказано можливість регулювання до чотирьох опалювальних контурів за кімнатною, зовнішньою або комбінованою схемою. Крім того, серія EMS plus підтримує підключення сонячних модулів, змішувальних модулів та інших компонентів системи. У матеріалах Buderus також зазначається сумісність RC310 зі смартфоном застосунком, а брендова екосистема MyBuderus дає можливість дистанційно змінювати температуру, програми часу, переглядати стани пристроїв і повідомлення про події. Таким чином, RC310 є функціонально розвиненим рішенням, однак базова комплектація цього контролера менш універсальна, ніж у Vaillant sensoCOMFORT» [31].

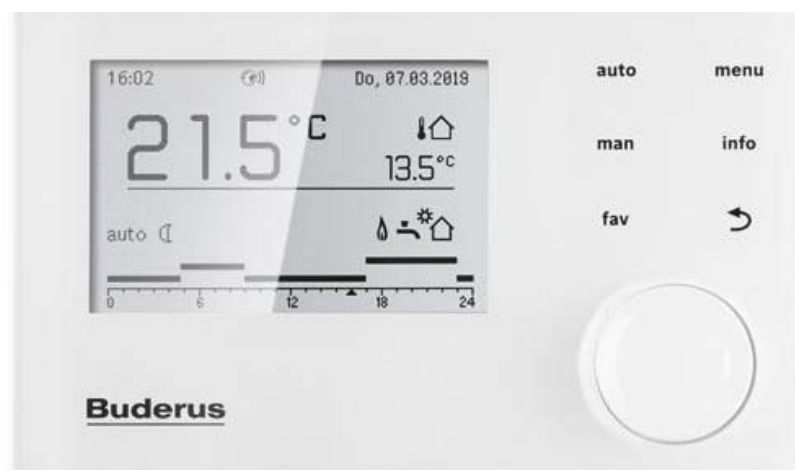


Рисунок 2.15- Buderus Logamatic RC310

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 56   |

Контролер Viessmann Vitotronic 200 (рисунок 2.16) разом із «модулем Vitocconnect і застосунком ViCare забезпечує погодозалежне керування та дистанційний доступ до системи опалення. У документації Viessmann зазначено, що Vitotronic 200 використовується як погодозалежний цифровий контролер; для низки теплових насосів Vitocal він дозволяє інтегрувати два окремі контури опалення, а в окремих виконаннях сімейства Vitotronic 200-Н застосовується керування трьома контурами зі змішувачем. Модуль Vitocconnect слугує інтерфейсом між контролером і мобільним застосунком, забезпечуючи керування зі смартфона та дистанційне сервісне обслуговування. Перевагою рішення Viessmann є висока надійність і добре розвинена сервісна екосистема, проте в межах саме побутової гібридної системи з кількома джерелами теплоти його гнучкість часто більше залежить від конкретної модифікації контролера і складу обладнання, ніж у Vaillant чи Bosch» [32].



Рисунок 2.16 Контролер Viessmann Vitotronic 200

Порівняння досліджуваних пристроїв показує, що всі вони реалізують погодозалежне регулювання та дозволяють організувати дистанційний контроль. Однак їх придатність до використання в гібридній системі різна. Для системи, у якій тепловий насос працює разом із резервним газовим котлом, буферною ємністю, контуром радіаторного опалення, контуром теплої підлоги та гарячим водопостачанням, найбільш важливими є: універсальність щодо різних джерел теплоти, підтримка багатоконтурності,

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 57   |

можливість модульного нарощування та зручна віддалена діагностика. Для порівняльного аналізу контролерів гібридної системи опалення було застосовано метод багатокритеріальної експертної оцінки. Вибір зазначеного методу зумовлений тим, що значна частина характеристик пристроїв керування не має прямого числового вираження в технічній документації, а визначається через функціональні можливості, гнучкість налаштування, сумісність із компонентами системи та рівень сервісної підтримки. Для коректного порівняння контролерів різних виробників було визначено систему з п'яти критеріїв оцінювання, кожен з яких безпосередньо впливає на ефективність функціонування гібридної системи опалення: підтримка гібридної системи, можливість погодозалежного регулювання, наявність дистанційного підключення та керування, масштабованість системи й можливість підключення додаткових контурів, а також практична придатність до досліджуваної системи опалення. Кожен із зазначених критеріїв оцінювався за чотирибальною шкалою. Максимальний бал - 4 - присвоювався у випадку, коли функція реалізована повноцінно, належним чином задокументована та придатна для безпосереднього використання у складній гібридній системі. Оцінка 3 бали відповідала ситуації, коли функція реалізована добре, проте з певними обмеженнями. Бал 2 виставлявся за часткову реалізацію функції або необхідність залучення додаткових модулів чи уточнення конфігурації. Значення 1 бал відповідало обмеженим реалізаціям функції, тоді як 0 балів означало її відсутність або непідтвердженість у технічній документації [33].

Інтегральна оцінка контролера визначалася як сума балів за всіма критеріями відповідно до такого виразу:

$$I = \sum_{i=1}^n B_i = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 \quad (2.1)$$

де  $I$  - інтегральна експертна оцінка контролера;  $B_i$  - бал за  $i$ -м критерієм;  $n$  — загальна кількість критеріїв оцінювання. Відповідно,  $B_1$  відображає оцінку підтримки гібридної системи,  $B_2$  — реалізацію погодозалежного

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 58   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

регулювання,  $B_3$  — можливості дистанційного керування,  $B_4$  — масштабованість та кількість контурів,  $B_5$  — відповідність досліджуваних схемі опалення. Оскільки максимальна оцінка за одним критерієм становить 4 бали, а критеріїв визначено 5, максимально можлива інтегральна оцінка дорівнює  $I_{\max} = 5 \cdot 4 = 20$  балів.

Розрахунок інтегральної оцінки для контролера Vaillant sensoCOMFORT VRC 720 у комплекті з модулем myVAILLANT connect показав, що за всіма п'ятьма критеріями він отримав по 4 бали, що відповідає максимальному значенню:  $I_{\text{Vaillant}} = 4 + 4 + 4 + 4 + 4 = 20$ .

Для контролера Bosch CW 400 у поєднанні з модулями K 40 RF і HomeCom Easy оцінки розподілилися таким чином: підтримка гібридної системи та погодозалежне регулювання отримали по 4 бали, тоді як дистанційне керування, масштабованість і придатність до системи — по 3 бали, що дало інтегральну оцінку  $I_{\text{Bosch}} = 4 + 4 + 3 + 3 + 3 = 17$ .

Контролер Buderus Logamatic RC310 із модулем MyBuderus набрав 3 бали за підтримку гібридної системи, 4 бали — за погодозалежне регулювання та по 3 бали за решту критеріїв, що відповідає результату  $I_{\text{Buderus}} = 3 + 4 + 3 + 3 + 3 = 16$ .

Найнижчу інтегральну оцінку серед досліджуваних зразків отримав Viessmann Vitotronic 200 із модулями Vitoconnect і ViCare: за підтримку гібридної системи — 3 бали, за погодозалежне регулювання — 4 бали, за дистанційне керування — 3 бали, за масштабованість і придатність до системи — по 2 бали, що дає  $I_{\text{Viessmann}} = 3 + 4 + 3 + 2 + 2 = 14$ .

На побудованому за результатами розрахунків графіку на рисунку 2.17 по осі абсцис відкладено назви досліджуваних контролерів, а по осі ординат - значення інтегральної експертної оцінки в балах. Висота кожного стовпчика прямо відображає ступінь відповідності конкретного контролера вимогам досліджуваної гібридної системи опалення. Найвище значення зафіксовано для Vaillant sensoCOMFORT VRC 720, який отримав максимальні 20 балів із 20 можливих, що свідчить про його повну відповідність усім ключовим

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 59   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

критеріям: забезпечення погодозалежного керування, підтримка гібридного режиму роботи, наявність засобів дистанційного доступу та висока масштабованість для багатоконтурної структури.

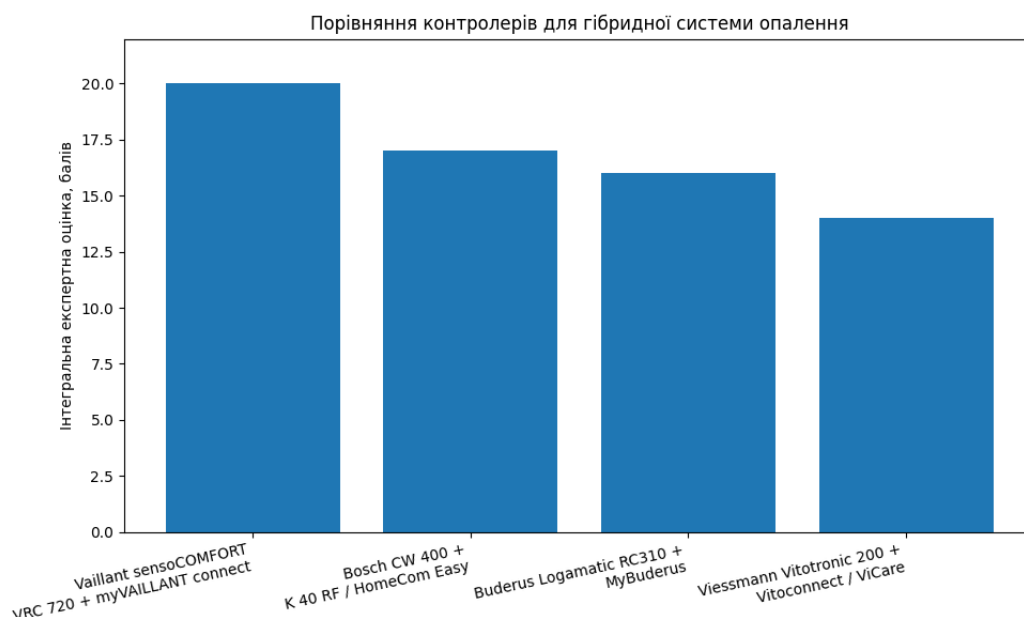


Рисунок 2.17- Порівняння контролерів для гібридної системи опалення на основі теплового насосу

Таким чином, результати порівняльного аналізу свідчать про те, що найбільш доцільним пристроєм керування для гібридної системи опалення на основі теплового насоса є контролер Vaillant sensoCOMFORT VRC 720. Його перевага визначається максимальною відповідністю ключовим технічним вимогам: підтримці гібридної архітектури, реалізації погодозалежного регулювання, забезпеченню дистанційного моніторингу та керування, а також зручності масштабування системи. На підставі наведеного аналізу зазначений контролер може бути рекомендований як основний елемент автоматизації досліджуваної системи.

Отже, для досліджуваної гібридної системи опалення найбільш доцільно рекомендувати контролер Vaillant sensoCOMFORT VRC 720 у поєднанні з інтернет-модулем myVAILLANT connect. Такий вибір обґрунтовується кількома чинниками: по-перше, пристрій підтримує погодозалежне керування і роботу з кількома типами теплогенераторів; по-друге, він придатний до побудови багатоконтурної системи з модулями

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 60   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

розширення; по-третє, забезпечується дистанційний моніторинг, зміна параметрів і сервісна діагностика; по-четверте, виробник прямо орієнтує це рішення на складні, гібридні та відновлювані системи. Bosch CW 400 і Buderus RC310 також можуть розглядатися як технічно сильні альтернативи, однак у контексті саме універсальної гібридної системи з тепловим насосом Vaillant має найбільш збалансований функціональний профіль.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 61   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

### 3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ

#### 3.1 Розрахунок моделі гібридної системи опалення з тепловим насосом

Для дослідження режимів роботи гібридної системи опалення на основі теплового насоса доцільно побудувати математичну модель, яка дає змогу описати зміну температури теплоносія, теплового стану приміщення, впливу зовнішньої температури, а також роботу регулятора в контурі керування. Така модель є основою для подальшого синтезу системи автоматичного регулювання, вибору параметрів ПІД-регулятора та імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.

У спрощеному вигляді система опалення з тепловим насосом може бути представлена як сукупність таких функціональних елементів: тепловий насос як джерело теплової енергії, гідравлічний контур із теплоносієм, опалювальні прилади або тепла підлога як споживач теплоти, приміщення як теплова ємність, а також регулятор, який формує керуючий вплив залежно від відхилення температури. Основною регульованою величиною приймається температура внутрішнього повітря в приміщенні або температура подачі теплоносія в контур опалення.

Для побудови математичної моделі приймемо такі припущення: параметри системи в межах робочого діапазону є зосередженими; теплофізичні властивості теплоносія не змінюються; втрати теплоти описуються лінійною залежністю від різниці температур; динаміка теплового насоса в першому наближенні може бути подана аперіодичною ланкою першого порядку; будівля або окреме приміщення розглядається як об'єкт із тепловою ємністю та тепловтратами в навколишнє середовище.

Температурний стан приміщення описується рівнянням теплового балансу:

$$\frac{C_b dT_{(m)}(t)}{dt} = Q_{H(t)} - K_b (T_{(m)}(t) - T_{(out)}(t)) \quad (3.1)$$

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 62   |

де  $C_b$  - теплова ємність будівлі;

$K_b$  - коефіцієнт тепловтрат;

$T_{in}$  - внутрішня температура;

$T_{out}$  — зовнішня температура.

Теплова потужність системи опалення визначається як:

$$Q_h(s) = K_h(T_s(s) - T_{in}(s)) \quad (3.2)$$

де  $K_h$  — коефіцієнт тепловіддачі системи опалення;

$T_s$  — температура подачі теплоносія.

Після підстановки отримуємо узагальнене рівняння:

$$\frac{C_b dT_{in}}{dt} = K_h T_s - (K_h + K_b) T_{in} + K_b T_{out} \quad (3.3)$$

Динаміка теплового насоса описується аперіодичною ланкою першого порядку, що враховує інерційність процесів теплообміну.

Рівняння динаміки теплового насоса:

$$\frac{T_{np} dT_s}{dt} + T_s = K_{np} T_{out} \quad (3.4)$$

Передавальна функція теплового насоса:

$$W_{np}(s) = \frac{K_{np}}{T_{np}s + 1} \quad (3.5)$$

Ураховуючи теплову інерційність будівлі, об'єкт керування доцільно описати передавальною функцією другого порядку. Передавальна функція об'єкта регулювання:

$$W_o(s) = \frac{K_o}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (3.6)$$

де  $T_1$  - стала часу теплового насоса;

$T_2$  - стала часу будівлі.

Погодозалежне регулювання реалізується за формулою:

$$T_s^*(s) = a - b T_{out}(s) \quad (3.7)$$

Ця залежність дозволяє автоматично змінювати температуру подачі залежно від погодних умов.

Похибка регулювання визначається як:

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 63   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

$$e(t) = T_{set}(t) - T_m(t) \quad (3.8)$$

Керуючий сигнал формується ПІД-регулятором:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + \frac{K_d de(t)}{dt} \quad (3.9)$$

Передавальна функція ПІД-регулятора:

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.10)$$

Тепловий насос як джерело теплоти має інерційний характер, тому його динаміку доцільно описати аперіодичною ланкою першого порядку:

$$T_{hp} \cdot dT_s(t)/dt + T_s(t) = K_{hp} \cdot u(t) \quad (3.11)$$

де:

$T_{hp}$  - стала часу теплового насоса, с;

$K_{hp}$  - коефіцієнт передачі теплового насоса;

$u(t)$  - керуючий сигнал регулятора.

У операторній формі передавальна функція теплового насоса матиме вигляд:

$$W_{hp}(s) = T_s(s) / U(s) = K_{hp} / (T_{hp} \cdot s + 1) \quad (3.12)$$

З урахуванням додаткової інерційності системи опалення та приміщення об'єкт регулювання можна наближено подати послідовним з'єднанням двох аперіодичних ланок:

$$W_o(s) = K_o / ((T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)) \quad (3.13)$$

де:

$K_o$  - загальний коефіцієнт передачі об'єкта;

$T_1$  — стала часу теплового насоса та гідравлічного контуру;

$T_2$  — стала часу теплової інерції приміщення.

Така модель є досить зручною для інженерного розрахунку регулятора, оскільки відображає дві ключові властивості системи: відносно швидку динаміку джерела теплоти та значно повільнішу реакцію будівлі.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 64   |

Для систем з тепловими насосами доцільним є погодозалежне керування, при якому необхідна температура подачі визначається залежно від зовнішньої температури. У загальному вигляді така залежність може бути записана так:

$$T_s^*(t) = a - b \cdot T_{out}(t)$$

де:  $T_s^*(t)$  — задана температура подачі, °C;

$a$  — параметр, що визначає рівень температурного графіка;

$b$  — коефіцієнт нахилу погодної кривої.

Ця залежність означає, що зі зниженням зовнішньої температури система автоматично збільшує температуру подачі, а при потеплінні — зменшує її, що сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню сезонної ефективності теплового насоса.

Помилка регулювання визначається як різниця між заданою та поточною температурою:

$$e(t) = T_{set}(t) - T_{in}(t)$$

Керуючий вплив формується ПІД-регулятором:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot de(t)/dt \quad (3.14)$$

де:  $K_p$  - пропорційний коефіцієнт;

$K_i$  - інтегральний коефіцієнт;

$K_d$  - диференціальний коефіцієнт.

Передавальна функція ПІД-регулятора в операторній формі:

$$WPID(s) = K_p + K_i/s + K_d \cdot s$$

У замкненій системі передавальна функція набуває вигляду:

$$Wcl(s) = WPID(s) \cdot Wo(s) / (1 + WPID(s) \cdot Wo(s))$$

Отримана математична модель дає можливість дослідити перехідні процеси в системі опалення, оцінити вплив параметрів регулятора на швидкодію, перерегулювання та статичну похибку, а також вибрати

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 65   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

оптимальні налаштування для забезпечення стабільної та енергоефективної роботи теплового насоса.

Для інженерного підбору параметрів ПІД-регулятора прийmemo, що об'єкт описується передавальною функцією:

$$W_o(s) = K_o / ((T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1))$$

Нехай для досліджуваної системи прийнято:  $K_o = 1,2$ ;  $T_1 = 300$  с;  $T_2 = 1800$  с.

Для попереднього налаштування використаємо метод спрощеного інженерного синтезу. Як початкове наближення приймаємо:

$$T_i \approx T_2 = 1800 \text{ с}$$

$$T_d \approx T_1 / 4 = 300 / 4 = 75 \text{ с}$$

$$K_p = (T_1 + T_2) / (K_o \cdot 4 \cdot T_2) = (300 + 1800) / (1,2 \cdot 4 \cdot 1800) = 2100 / 8640 \approx 0,243$$

$$K_i = K_p / T_i = 0,243 / 1800 \approx 1,35 \cdot 10^{-4}$$

$$K_d = K_p \cdot T_d = 0,243 \cdot 75 \approx 18,2$$

Отже, початкові параметри ПІД-регулятора можна прийняти такими:  $K_p = 0,243$ ;  $K_i = 1,35 \cdot 10^{-4}$ ;  $K_d = 18,2$ . На основі наведених розрахунків можна визначити наступні параметри :

1. Погодна крива -  $T_s(t) = a - b \cdot T_{out}(t)$  Показує, (рисунок 3.1) як система автоматично встановлює температуру подачі залежно від вуличного холоду. Чим крутіший нахил  $b$ , тим агресивніше система реагує на мороз. Параметр  $a$  задає "базовий" рівень тепла.

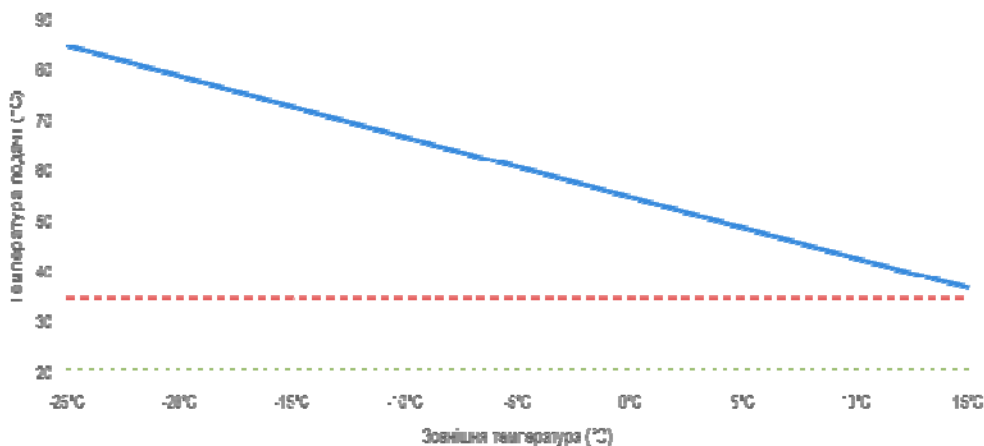


Рисунок 3.1- Погодна крива

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 66   |

Перший графік відображає погодозалежну криву — статичну характеристику системи автоматичного коригування температури теплоносія залежно від поточних кліматичних умов.

На графіку зображено три варіанти кривої при різних значеннях коефіцієнта нахилу  $b$  для фіксованого базового рівня  $a = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

- $b = 0,7$  - м'яке регулювання: система слабо реагує на похолодання, що може призводити до недогріву при низьких температурах;
- $b = 1,2$  - стандартне налаштування: забезпечує збалансоване підвищення температури подачі відповідно до кліматичних умов;
- $b = 2,0$  - агресивне регулювання: значне підвищення температури подачі при незначному похолоданні, що збільшує споживання енергії, але забезпечує надійне опалення.

Горизонтальна пунктирна лінія на рівні  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  відображає мінімально допустиму температуру подачі для системи, нижче якої тепловий насос не знижує температуру теплоносія незалежно від зовнішніх умов. Ця межа визначається технічними характеристиками опалювального обладнання та вимогами санітарних норм.

2. Динаміка температури (рисунки 3.2) в приміщенні — задається наступним значенням:

$$C_b \cdot dT_{in}/dt = K_h \cdot (T_s - T_{in}) - K_b \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (3.15)$$

Перехідний процес нагріву кімнати від зовнішньої температури до усталеного режиму. Велика теплова ємність  $C_b$  — повільний нагрів, великі тепловтрати  $K_b$  — нижче кінцеве значення.

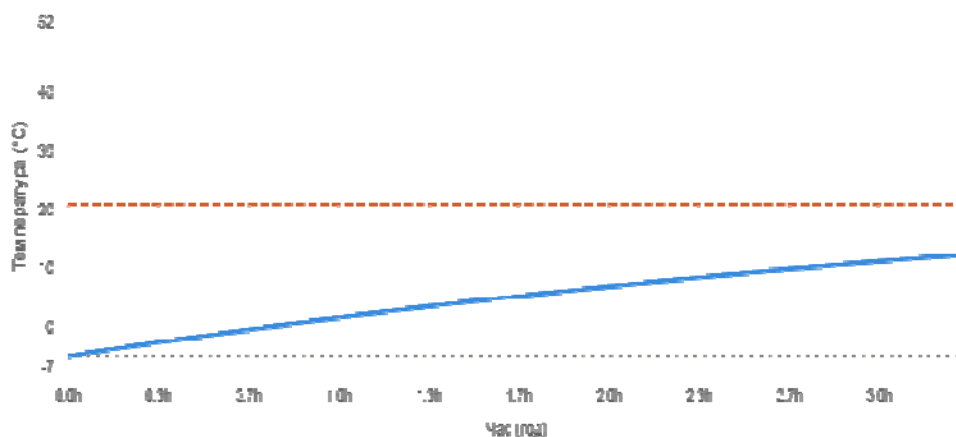


Рисунок 3.2- Динаміка температури

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 67   |

Другий графік ілюструє динаміку зміни температури внутрішнього повітря в процесі нагріву приміщення від початкового стану ( $T_{in} = T_{out}$ ) до усталеного значення.

Для побудови графіка прийнято такі значення параметрів:  $K_h = 300$  Вт/°С,  $K_b = 200$  Вт/°С,  $T_s = 50$  °С,  $T_{out} = -5$  °С. Початкова температура приміщення дорівнює зовнішній температурі ( $T_{in}(0) = T_{out} = -5$  °С). На графіку порівнюються три криві, що відповідають різним значенням теплової ємності будівлі:

- $C_b = 3$  МДж/°С - легка будівля (каркасна конструкція): швидкий нагрів, але температура чутлива до збурень;
- $C_b = 8$  МДж/°С - стандартна цегляна будівля: помірна швидкість нагріву та задовільна теплова стабільність;
- $C_b = 16$  МДж/°С - масивна будівля (монолітний бетон): значна теплова інерційність, дуже повільний нагрів, але висока стабільність після досягнення усталеного режиму.

При заданих параметрах:  $T_{in}(\infty) = (300 \cdot 50 + 200 \cdot (-5)) / (300 + 200) = (15000 - 1000) / 500 = 28,0$  °С, що перевищує задане значення  $21$  °С — система має достатній запас потужності для підтримання комфортної температури навіть при значних тепловтратах.

3. Замкнена система з ПІД-регулятором представле на рисунку 3.3. Реакція системи на ступінчасте завдання  $T_{set} = 21$  °С при об'єкті  $W_o(s) = 1.2 / ((300s+1)(1800s+1))$ . Збільшуйте  $K_p$  - система прискорюється, але зростає перерегулювання. Зменшуйте  $K_i$  - збільшується статична похибка.  $K_d = 18.2$  забезпечує демпфування коливань. Третій графік демонструє поведінку замкненої системи автоматичного регулювання з ПІД-регулятором при ступінчастій зміні завдання температури ( $T_{set} = 21$  °С). Об'єкт керування описується передавальною функцією, що являє собою послідовне з'єднання двох аперіодичних ланок:

$$W_o(s) = K_o / ((T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1))$$

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 68   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

де  $K_o = 1,2$ ;  $T_1 = 300$  с;  $T_2 = 1800$  с. Передавальна функція ПІД-регулятора:

$$W_{PID}(s) = K_p + K_{i/s} + K_d \cdot s$$

Початкові параметри ПІД-регулятора, розраховані методом спрощеного інженерного синтезу:

- $K_p = 0,243$  - пропорційний коефіцієнт;
- $K_i = 1,35 \cdot 10^{-4}$  - інтегральний коефіцієнт;
- $K_d = 18,2$  - диференціальний коефіцієнт.

На графіку зображено такі залежності від часу:

- яскраво-синя крива - вихідна температура  $T_{in}(t)$  при стандартних налаштуваннях ( $K_p = 0,243$ ): система плавно виходить на задане значення без суттєвого перерегулювання;
- напівпрозора пунктирна крива —  $T_{in}(t)$  при збільшеному  $K_p = 0,6$ : спостерігається підвищене перерегулювання та коливання в перехідному процесі;
- зелена крива — керуючий сигнал  $u(t)$  (масштабований): показує активність регулятора, зокрема інтенсивний імпульс у початковий момент часу.

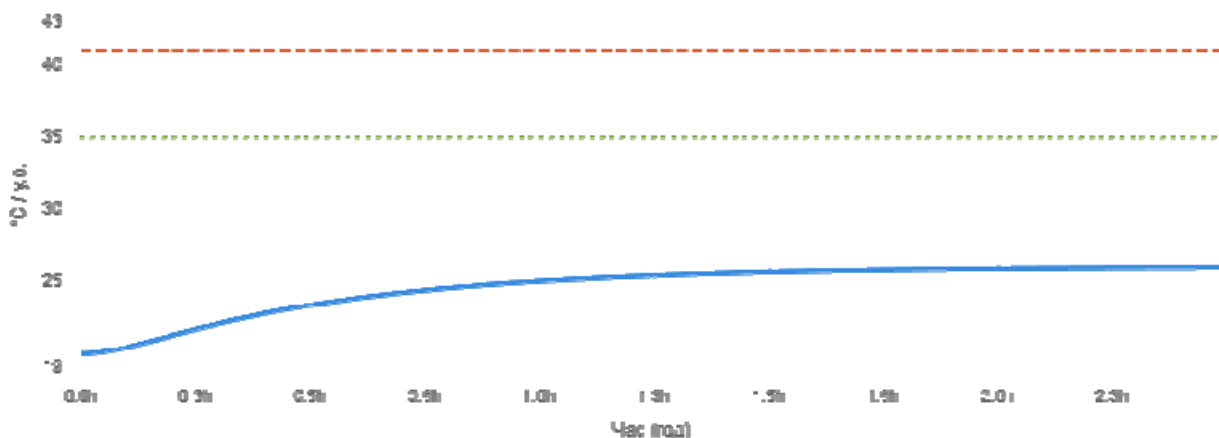


Рисунок 3.3- Використання PID регулятора

Передавальна функція замкненої системи визначається за формулою:

$$W_{cl}(s) = W_{PID}(s) \cdot W_o(s) / (1 + W_{PID}(s) \cdot W_o(s))$$

Якість перехідного процесу оцінюється такими показниками:

- час виходу на режим (5% зона):  $t_p \approx 3 - 4$  год при стандартних налаштуваннях;

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 69   |

- перерегулювання при  $Kp = 0,243$ :  $\sigma < 5\%$ , що відповідає вимогам до теплових систем;
- статична похибка:  $\Delta T = 0$  (завдяки наявності інтегральної складової  $Ki$ ).

3. Перехідна характеристика теплового насоса представлена наступною формулою:

$$Whp(s) = K_{hp} / (Thp \cdot s + 1)$$

Графік представлений на рисунку 3.4 ілюструє реакцію теплового насоса на одиничний ступінчастий керуючий вплив  $u(t) = 1$ . Динаміка теплового насоса моделюється аперіодичною ланкою першого порядку з передавальною функцією.

На графіку відображено чотири характерні лінії:

- синя крива  $T_s(t)$  - вихідна температура теплоносія, що плавно наближається до усталеного значення (аперіодичний характер, без коливань);
- червона пунктирна лінія - усталене значення  $K_{hp} \cdot u = 1,2 \text{ } ^\circ\text{C}$  (рівень, до якого прагне вихід при нескінченному часі);
- сіра пунктирна лінія - рівень 63,2% від усталеного значення:  $T_s(Thp) = 0,632 \cdot K_{hp} \cdot u \approx 0,758 \text{ } ^\circ\text{C}$  (досягається рівно через  $Thp = 300 \text{ c}$ );
- зелена пунктирна лінія - рівень 95,0% від усталеного значення:  $T_s(3 \cdot Thp) = 0,950 \cdot K_{hp} \cdot u \approx 1,14 \text{ } ^\circ\text{C}$  (досягається через  $3 \cdot Thp = 900 \text{ c}$ ).

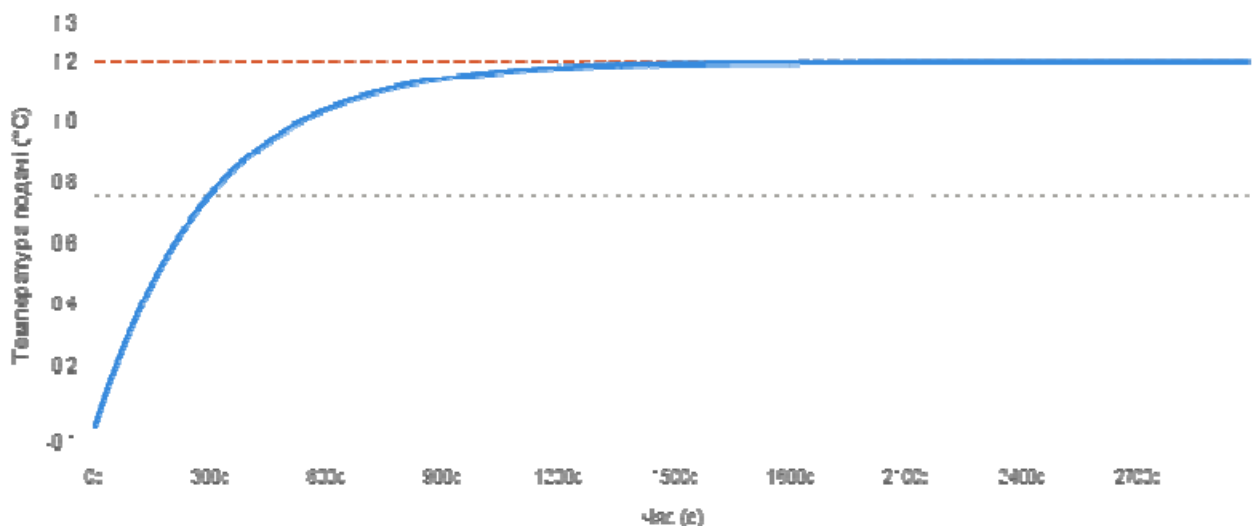


Рисунок 3.4.- Реакцію теплового насоса на одиничний ступінчастий керуючий вплив  $u(t) = 1$

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 70   |

Аперіодична ланка першого порядку — вихід ніколи не "стрибає", лише плавно наближається до  $K_{hr} \cdot u$ . Стала часу  $T_{hr}$  задає швидкість реакції: за  $3 \cdot T_{hr}$  досягається 95% кінцевого значення.

Ці значення є стартовими і далі мають уточнюватися за результатами імітаційного моделювання. Якщо система виявиться занадто повільною, збільшують  $K_p$ . Якщо спостерігається статична похибка, коригують  $K_i$ . Якщо виникають коливання або перерегулювання, зменшують  $K_p$  або збільшують демпфування за рахунок  $K_d$ .

Математична модель системи опалення з тепловим насосом представлена сукупністю рівнянь теплового балансу приміщення, моделі теплового насоса як інерційної ланки та регулятора, який формує керуючий сигнал за температурною похибкою. Запропонована модель враховує теплову інерційність приміщення, тепловтрати, динаміку зміни температури теплоносія та вплив зовнішньої температури через погодозалежне регулювання.

Проведений графічний аналіз математичної моделі системи опалення з тепловим насосом дозволяє зробити такі висновки.

По-перше, погодна крива (рисунок 3.1) підтверджує доцільність застосування погодозалежного керування: коефіцієнт нахилу  $b = 1,2$  забезпечує оптимальний баланс між енергоефективністю та якістю обігріву для середньоевропейського клімату.

По-друге, динаміка нагріву приміщення ((рисунок 3.2) демонструє суттєвий вплив теплової ємності будівлі на час виходу на режим. Для стандартної будівлі ( $C_b = 8 \text{ МДж/}^\circ\text{C}$ ) час повного прогріву становить близько 13 годин, що необхідно враховувати при програмуванні добових графіків роботи системи.

По-третє, аналіз замкненої системи (рисунок 3.3) показує, що розраховані параметри ПІД-регулятора ( $K_p = 0,243$ ;  $K_i = 1,35 \cdot 10^{-4}$ ;  $K_d = 18,2$ ) забезпечують якісний перехідний процес з перерегулюванням менше 5% та нульовою статичною похибкою, що відповідає вимогам нормативних

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 71   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

документів до систем автоматичного регулювання температури в житлових приміщеннях.

По-четверте, перехідна характеристика теплового насоса (рисунок 3.4) підтверджує аперіодичний характер ланки з достатньо малою сталою часу  $T_1 = 300$  с порівняно з тепловою інерційністю будівлі  $T_2 = 1800$  с. Це співвідношення є сприятливим для синтезу регулятора та забезпечення стійкої роботи замкненої системи.

### 3.2 Розробка алгоритму управління гібридною системою опалення на основі теплового насосу

В сучасних умовах підвищення енергоресурсів та необхідності переходу до енергоефективних технологій особливої актуальності набувають гібридні системи опалення, які поєднують традиційні та відновлювані джерела енергії. На основі запропонованої структури на рисунку 3.5 розглядається система, яка інтегрує газовий котел, тепловий насос, буферну ємність, насосні групи, сонячний тепловий колектор, фотоелектричні панелі та інтелектуальну систему керування на базі контролера Vaillant sensoCOMFORT VRC 720. Така конструкція дозволяє реалізувати адаптивне управління тепловими потоками залежно від зовнішніх умов, енергетичних ресурсів та теплового ресурсу. навантаження об'єкта.

Розробка алгоритму управління базується на принципах ієрархічної оптимізації, де основне джерело теплової енергії має оптимальне використання. Найвищий пріоритет надається сонячному тепловому колектору як вільному та екологічно чистому джерелу енергії. У разі достатнього рівня сонячного випромінювання та перевищення температури теплоносія в колекторі над температурою у буферній ємності активується циркуляційний контур сонячної системи, що забезпечує передачу теплової енергії до акумулятора. Це дозволяє мінімізувати використання інших джерел та накопичувати тепло для подальшого використання.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 72   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

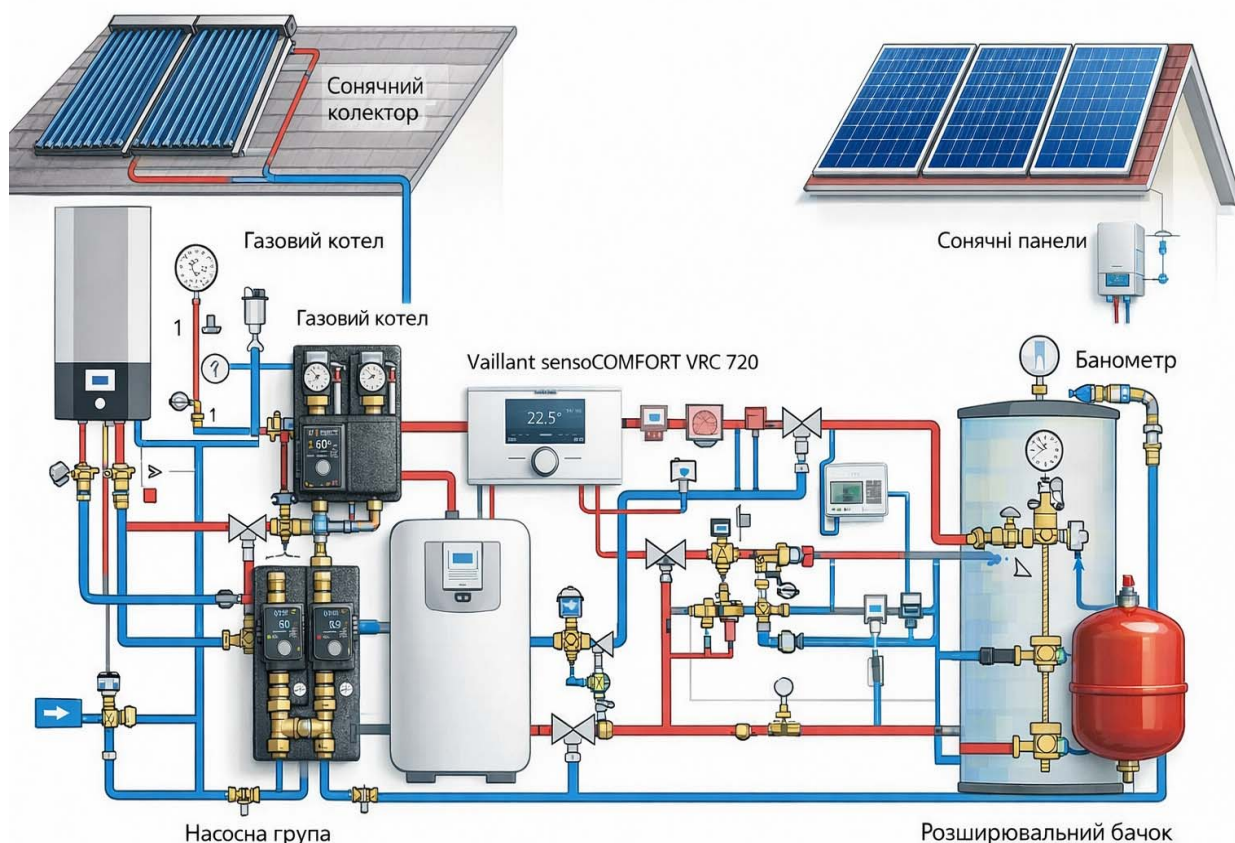


Рисунок 3.5- Гібридна система опалення на основі теплового насоса

У випадку недостатньої генерації сонячної енергетичної системи система переходить до використання теплового насоса, який виступає основним джерелом тепла в міжсезонний період та при помірних температурах зовнішнього повітря. Ефективність роботи теплового насоса знижується коефіцієнтом перетворення (COP), який залежить від температури зовнішнього середовища. Тому в алгоритмі реалізовано погодозалежне регулювання, що дозволяє змінювати температуру подачі теплоносія відповідно до зміни температури зовнішнього повітря. Це забезпечує оптимальний баланс між енергоефективністю та комфортом. Додатково враховується електроенергія, вироблена сонячними панелями: у разі її надлишкового алгоритму потрібна робота теплового насоса, що дозволяє ефективно використовувати власну генерацію.

Газовий котел у цій системі виконує роль резервного та пікового джерела теплової енергії. Його включення відбувається у випадку, якщо

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 73   |

ефективність теплового насоса знижується (наприклад, при низьких температурах зовнішнього повітря), або коли система не здатна швидко досягти заданого температурного режиму. Крім того, котел забезпечує стабільність роботи системи в аварійних ситуаціях або при значних теплових навантаженнях. У певних режимах можливе комбіноване використання теплового насоса та газового котла, що дозволяє скоротити час виходу системи на заданий режим та підвищити її гнучкість.

Ключовим елементом системи є буферна ємність, яка виконує функцію теплового акумулятора та гідравлічного розділювача. Вона дозволяє згладжувати нерівномірність теплогенерації та споживання, забезпечує стабільність температурного режиму та зменшує кількість включення/виключення обладнання. Алгоритм управління забезпечує контроль верхнього та нижнього температурних порогів у буфері, що дозволяє оптимізувати роботу джерел тепла та уникнути перевитрату енергії.

Важливу роль у функціонуванні систем змінюють насосні та регулюючі клапани, які забезпечують розподіл теплоносія між загальними контурами споживання, такими як радіаторне опалення, системи теплої підлоги гарячого та водопостачання. Алгоритм забезпечує динамічне керування цими елементами з урахуванням температурних режимів, споживача та поточного стану типу системи. Використання змішувальних вузлів дозволяє підтримувати необхідну температуру в кожному контурі незалежно від температури в буферній ємності.

Контролер Vaillant sensoCOMFORT VRC 720 виступає центральним елементом системи автоматизації, забезпечуючи збір даних з датчиків, обробку інформації та формування керуючих сигналів. Його функціональні можливості не можуть реалізувати складні алгоритми управління, включаючи погодозалежне регулювання, часове програмування, адаптацію до тарифів електроенергії та дистанційний моніторинг. Завдяки цій системі можна працювати в повністю автоматичному режимі, мінімізуючи втручання користувача.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 74   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

Розроблений алгоритм управління( рисунок 3.7) забезпечує комплексну оптимізацію роботи гібридної системи опалення, враховуючи як технічні, так і економічні фактори. Алгоритм управління гібридною системою опалення функціонує за логікою порівняльного аналізу стану системи, визначення потреби в тепловій енергії та вибору оптимального джерела тепла з урахуванням енергоефективності, зовнішніх умов і технічних обмежень.

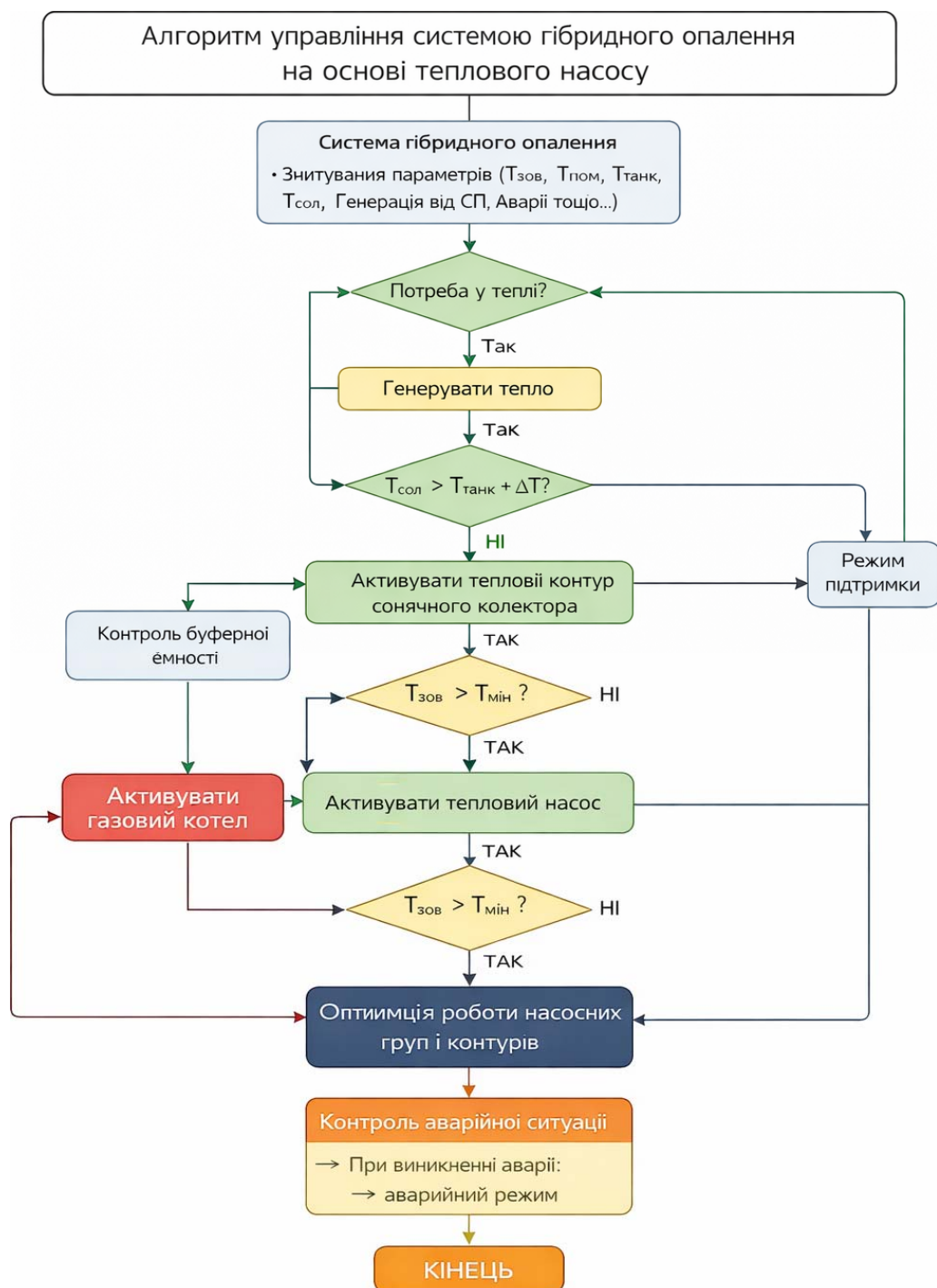


Рисунок 3.7-Алгоритм управління системою гібридного опалення на основі теплового насосу

У разі наявності потреби у теплий алгоритм першочергово перевіряє можливість використання сонячного поля, коли активується сонячний контур, що дозволяє передавати теплову енергію до системи без додаткових витрат енергоресурсів. У цьому режимі інші джерела тепла не використовують, що забезпечує максимальну ефективність. Якщо ж сонячної енергії роботи недостатньо, алгоритм переходить до оцінки ефективності теплового насоса. У випадку, коли температура зовнішнього повітря занадто низька і ефективність теплового насоса знижується, алгоритм передбачає включення газового котла. Його реалізація дозволяє значно знизити витрати енергоресурсів, підвищити ефективність використання відновлених джерел енергії та забезпечити високий рівень комфорту. Крім того, система набуває властивостей адаптивності та стійкості до змін зовнішніх умов, що є характерною ознакою сучасних кіберфізичних енергетичних систем.

Таким чином, запропонований підхід до побудови алгоритму управління гібридною системою опалення є ефективним інструментом підвищення енергоефективності та може бути використаний.

Додатково алгоритм передбачає деталізацію процедур адаптації систем до змінних умов експлуатації, а також впровадження елементів інтелектуального прогнозування. Доцільним є використання прогнозу погодних умов для випереджувального регулювання режимів роботи теплового насоса та газового котла. Наприклад, у разі очікування зниження температури зовнішнього повітря система може заздалегідь підвищити температуру в буферній ємності, використовуючи дешевші або відновлені джерела енергії, що дозволяє зменшити навантаження на систему в пікові періоди.

Окрему увагу слід приділити оптимізації системи роботи з урахуванням тарифів на електроенергію. У випадку використання алгоритму багатозонних тарифів можна зміщувати основні режими роботи теплового насоса на нічний період, коли вартість електроенергії є нижчою. При цьому накопичене тепло у буферній ємності використовується вдень для

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 76   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

забезпечення потреб опалення. Такий підхід дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати без зниження теплового комфорту.

Важливим напрямком удосконалення є інтеграція системи з технологіями "розумного будинку". Це забезпечує захист поведінкових факторів користувачів, графік їх присутності, а також індивідуальні налаштування температури для різних зон приміщення. Наприклад, у нічний температура може автоматично знизитися, що забезпечує додаткову економію енергії.

З технічної точки зору доцільним є впровадження алгоритмів самонавчання, які дозволяють системі адаптувати свої параметри на основі накопичених даних. Крім того, аналізуючи історію зміни температури, тривалість нагріву та ефективність різних джерел тепла, система може автоматично коригувати коефіцієнти погодозалежного регулювання, оптимізувати час підключення обладнання та зменшити енергоспоживання. Це особливо актуально для об'єктів зі змінним тепловим навантаженням.

Крім того, алгоритм управління повинен включати підсистему діагностики та обладнання захисту. Вона забезпечує контроль критичних параметрів, таких як тиск у системі, теплоносія, стан насосів та клапанів. У разі виявлення відхилень від нормальних значень система автоматично переходить у безпечний режим або вимикає відповідні компоненти. Наприклад, при перегріві теплоносія або зниженні тиску в системі може бути активований аварійний алгоритм із сигналізацією користувача.

Не меншою мірою є питання гідравлічної стабільності системи. Завдяки використанню буферної ємності та гідравлічного розділення контурів забезпечується незалежність роботи джерел тепла та споживачів. Алгоритм управління враховує ці особливості та координує роботу насосних груп таким чином, щоб уникнути гідравлічних перевантажень, та неефективного перемішування теплоносія.

У контексті використання сонячних панелей додатково розглядається можливість інтеграції системи накопичення електроенергії (акумуляторів).

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 77   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

Це дозволяє зберегти надлишкову електроенергію та використовувати її в періоди підвищеного споживання або білої генерації. Алгоритм управління в такому випадку розширює функції енергоменеджменту, що координує споживання електроенергії тепловим насосом, іншими електроприладами та зарядом/розрядом акумуляторів.

З точки зору математичного опису, система управління може бути представлена як багатокритеріальна оптимізаційна задача, де цільова функція враховує енергоспоживання, вартість ресурсів та рівень комфорту. Обмеженнями виступають технічні характеристики обладнання, температурні режими та умови безпеки. Розв'язання такої задачі може здійснюватися як класичними методами регулювання, так і сучасними підходами, включаючи нечітку логіку або нейромережеві алгоритми.

Таким чином, подальший розвиток алгоритму управління гібридною системою опалення відбувається у переході від статичних схем регулювання до адаптивних та інтелектуальних систем, здатних самостійно приймати рішення на основі великого обсягу даних. Це відкриває широкі перспективи для підвищення енергоефективності, зниження витрат та інтеграції з сучасними енергетичними мережами. У результаті формується комплексна кіберфізична система, яка забезпечує теплотехнічні процеси, інформаційні технології та автоматизоване управління, що забезпечує високий рівень ефективності та надійності.

Розроблена UML-модель алгоритму управління гібридною системою опалення (рисунок 3.8) демонструє формалізовану логіку роботи багатьох компонентів теплоенергетичної системи, яка інтегрує кілька джерел теплової енергії, зокрема сонячний колектор, тепловий насос та газовий котел, а також допоміжні елементи у вигляді буферної ємності та

Функціонування системи розроблено за принципом циклічного досвіду та організації рішень, що дозволяє забезпечити адаптивне реагування на зміну зовнішніх та внутрішніх параметрів. На початковому етапі виконується збір вхідної інформації з вимірювальних пристроїв, зокрема температури

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 78   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

зовнішнього середовища, температури в температурі, температури буферної ємності, температури теплоносія в сонячному колекторі, а також інформації про генерацію електроенергії від сонячних панелей та наявності аварійних сигналів. Такий підхід забезпечує формування актуального стану системи, необхідного для подальшого прийняття керуючих рішень.

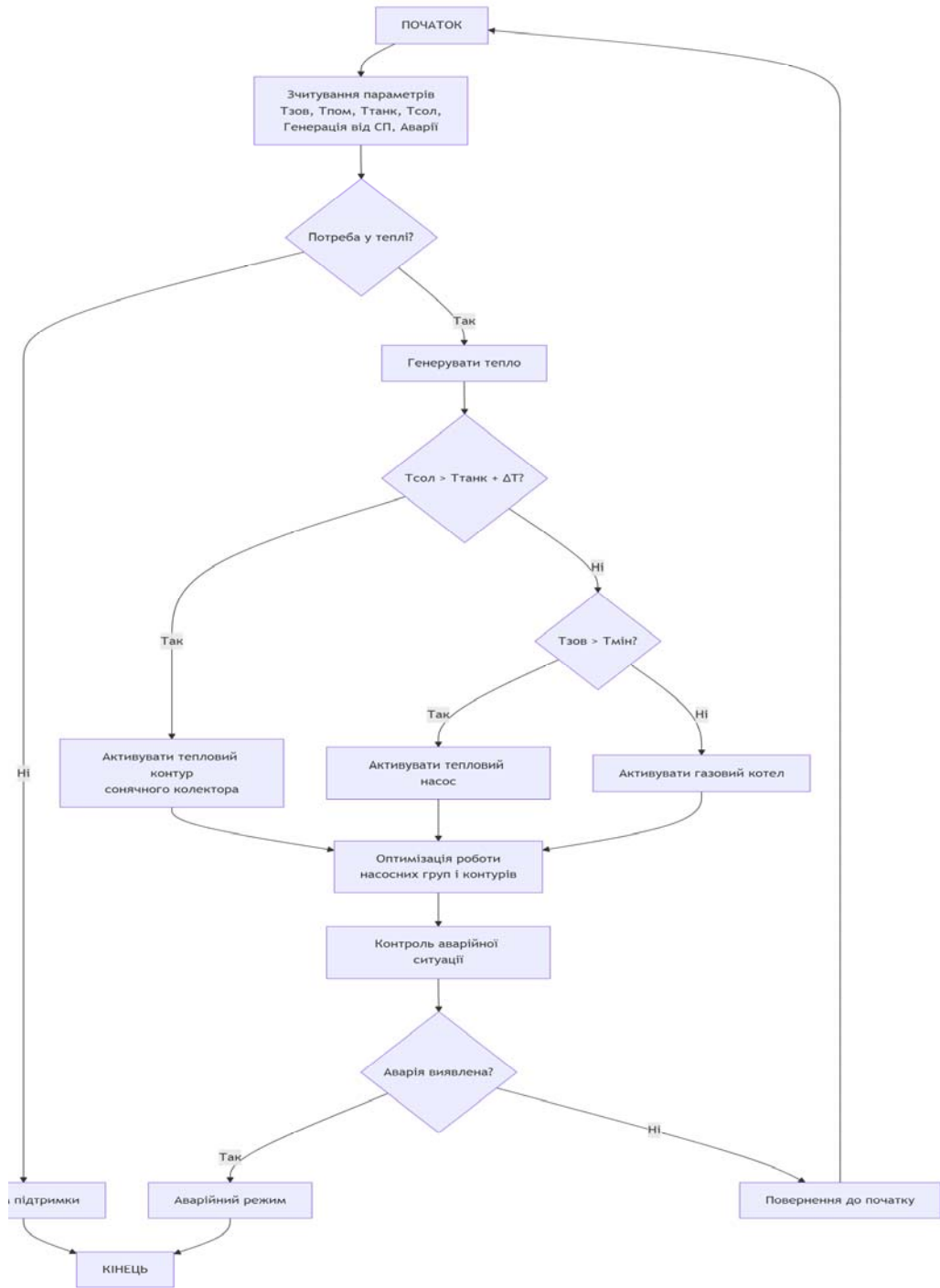


Рисунок 3.8 UML модель гібридної системи опалення на основі теплового насосу

Таким чином, запропонована UML-модель відображає ієрархічно структурований, адаптивний та енергоефективний алгоритм управління гібридною системою опалення. Вона забезпечує гарантійне використання відновлюваних джерел енергії, автоматичний вибір оптимального джерела тепла та високу надійність за рахунок інтегрованих механізмів контролю аварійного рівня. Модель є придатною для подальшої реалізації в середовищі імітаційного моделювання, таких як Simulink або Stateflow, а також для впровадження в промислових системах автоматизації.

### 3.3 Розробка SIMULINK моделі гібридної системи опалення на основі теплового насосу

Розробка імітаційної моделі гібридної системи опалення в середовищі MATLAB Simulink є початковим етапом дослідження, що дозволяє здійснити перевірку зовнішньої працездатності запропонованого алгоритму управління, оцінити динамічні характеристики системи та розробити ефективність використання різних джерел теплової енергії в умовах змінного навантаження та факторів.

Побудова Simulink-моделі базується на раніше сформованій UML-діаграмі діяльності, яка відображає логіку прийнятих рішень у системі. Основною метою моделювання є відтворення процесів генерації, накопичення та розподілу теплової енергії, а також ре

Структурно модель складається з кількох взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких відповідає окремому функціональному елементу гібридної системи опалення. До основних підсистем належать: підсистема джерел теплової енергії, підсистема накопичення тепла (буферна ємність), підсистема споживачів тепла, підсистема керування та підсистема зовнішніх впливів.

Підсистема джерел теплової енергії включає моделі сонячного колектора, теплового насоса та газового котла. Модель сонячного колектора

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 80   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

реалізується в залежності від теплової потужності від інтенсивності сонячного випромінювання та різниці температури між колектором і теплоносієм. Тепловий насос моделюється з урахуванням коефіцієнта перетворення (COP), який залежить від температури зовнішнього середовища, що дозволяє адекватно відобразити його ефективність у різних кліматичних умовах. Газовий котел у моделі виступає як резервне джерело тепла з фіксованою або регульованою теплою потужністю.

Підсистема буферної ємності виконує функцію акумулювання теплової енергії та стабілізації температурного режиму системи. Вона реалізується у вигляді інтегрованої формули:

$$C \frac{dT_{tank}}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3.16)$$

де  $C$  — теплоємність буферної ємності,  $T_{tank}$  — температура теплоносія в  $Q_{in}$  — сумарний тепловий потік від джерела,  $Q_{out}$  - теплове навантаження споживачів.

Підсистема споживачів тепла включає моделі контурів опалення (радіаторного та низькотемпературного, наприклад «теплі підлоги»), які описуються через теплові навантаження, залежні від температури внутрішнього середовища та заданого температурного режиму. У Simulink реалізується за допомогою блоків додаткових функцій або емпіричних залежностей.

Ключовим елементом моделі є підсистема керування, яка реалізує алгоритм, розроблений на основі UML-моделі. Вона включає логічні блоки (Switch, Relational Operator, Logical Operator), які визначають вибір джерела теплової енергії.

Для реалізації складної логіки доцільно використовувати Stateflow, що дозволяє представити систему в ряді кінцевого автомата зі станами: «очікування», «сонячний режим», «режим теплового насоса», «режим газового котла» та «аварійний режим».

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 81   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

Підсистема зовнішніх впливів включає змінні параметри навколишнього середовища, такі як температура зовнішнього повітря, інтенсивність сонячного випромінювання та профіль теплового навантаження. Дані можуть задаватися у вигляді сигналів часу (Signal Builder, From Workspace) або використовувати реальні експериментальні дані (рисунк 3.9).

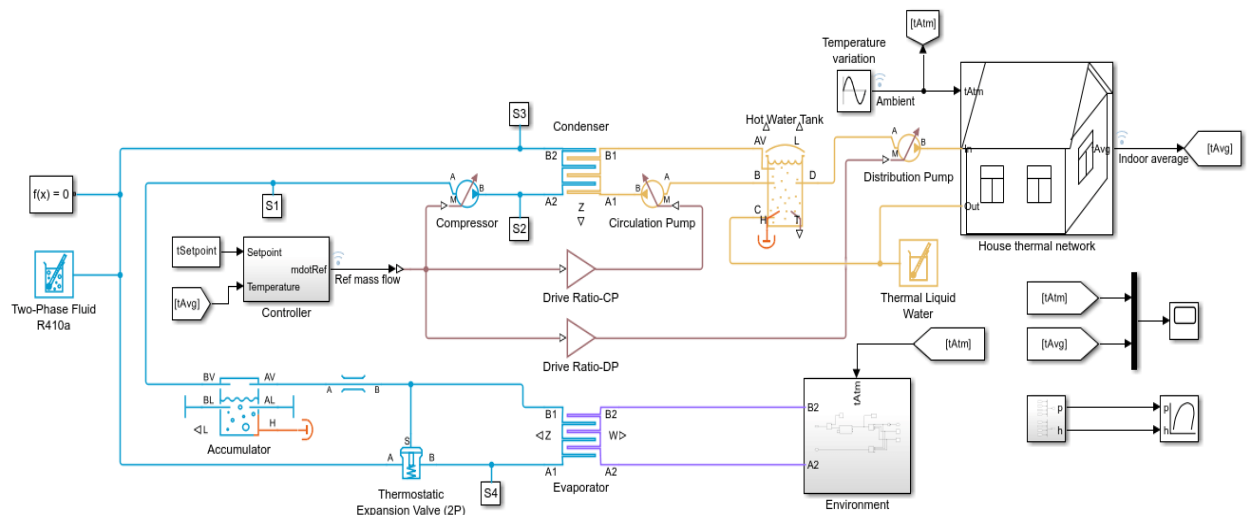


Рисунок 3.9 Simulink модель гібридної системи опалення на основі теплового насосу

У розробленій схемі на рисунку 3.9 наведена імітаційна модель системи теплового насоса типу «повітря–вода», призначеної для опалення житлового будинку із застосуванням водяних радіаторів як елементів тепловіддачі. Робочий цикл системи заснований на використанні двофазного холодоагенту, який відбирає теплову енергію від вологого атмосферного повітря та передає її теплоносію (воду). Холодоагент типу R410a циркулює в закритому контурі, проходячи через конденсатор, компресор, терморегулювальний розширювальний клапан і випарник.

У роботі розроблена модель (рисунк 3.10), що відображає теплові процеси в житловому приміщенні та описує механізм теплообміну між внутрішнім середовищем будівлі та зовнішнім середовищем через огорожувальні конструкції. Основним є аналіз динаміки температури

повітря в кімнаті з розрахунком впливу теплових втрат і теплових надходжень (рисунок 3.10).

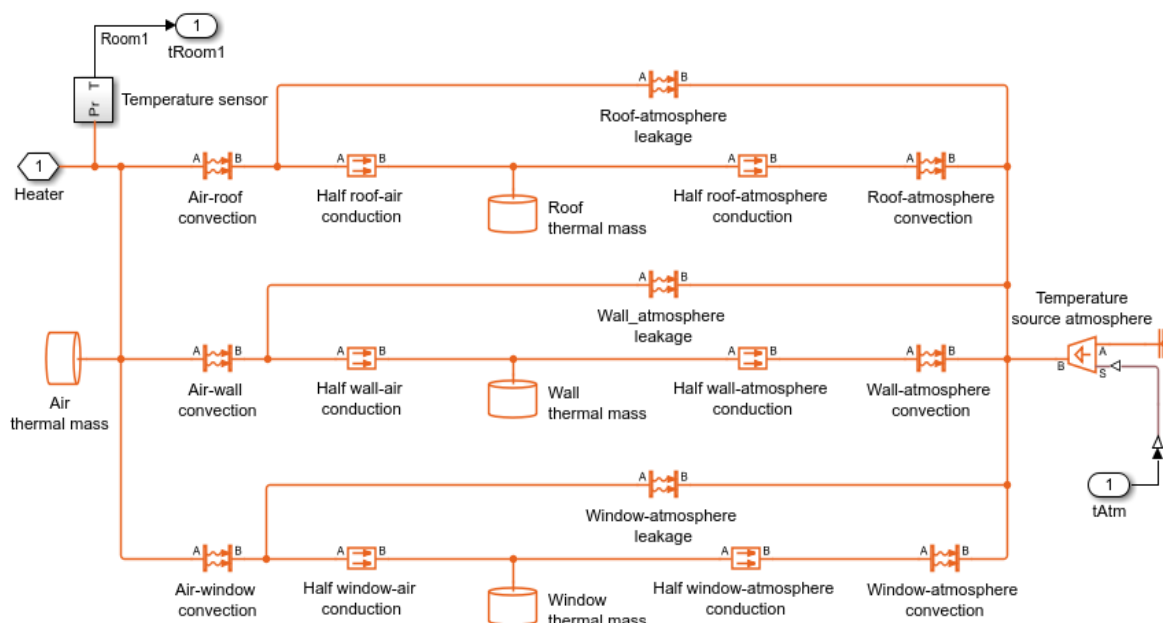


Рисунок 3.10- Simulink модель теплових процеси в житловому приміщенні

Теплообмін між внутрішнім повітрям і огорожувальними конструкціями (стінами, дахом і вікнами) здійснюється через механізм конвекції. Далі теплова енергія передається через товщу конструкції за теплопровідністю, яка моделюється як послідовність теплових опор. Кожен елемент конструкції має власну теплову інерцію, що враховується за допомогою відповідних теплів

Після проходження внутрішніх шарів огорожувальних конструкцій тепло передається до зовнішнього середовища. На цьому етапі також враховується конвективний теплообмін із атмосферним повітрям. деякі основні шляхи теплопередачі, у моделі враховано додаткові втрати тепла через інфільтрацію повітря, які описуються як витік теплової енергії через щілини та нещільність конструкції.

Максимальне зовнішнє середовище задається як вхідний вплив системи та підвищує інтенсивність теплових втрат. У результаті взаємодії

всіх описаних процесів формується динамічна рівновага між тепловими надходженнями від нагрівального елемента та тепловими втратами через ог.

Таким чином, модель дозволяє досліджувати теплову поведінку приміщення, оцінювати вплив конструктивних характеристик будівлі на енергоефективність та аналізувати ефективність системи опалення при різних зовнішніх умовах. Вона є одним з елементів при розробці системи автоматизованого управління опаленням, зокрема в поєднанні з тепловими насосами та іншими джерелами теплової енергії.

На рисунку 3.11 розроблена модель роботи підсистеми автоматичного регулювання температури, яка реалізує закритий контур керування з використанням сигналу зворотного зв'язку. Основним призначенням системи є підтримання температури в температурі на заданому рівні шляхом формування керуючого сигналу для виконавчих елементів системи опалення.

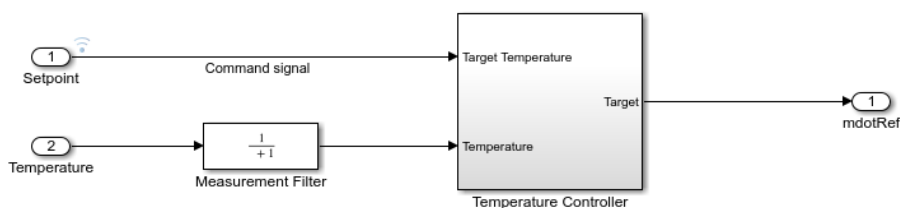


Рисунок 3.11- Simulink модель ідсистеми автоматичного регулювання температури

На вхід системи подається сигнал уставки (Setpoint), який хоче бажане значення температури в кімнаті. Цей сигнал надходить одночасно до регулятора температури як еталонне значення. Одночасно до системи подається виміряне значення температури, яке отримується з датчика та характеризує поточний стан об'єкта керування. Застосування такого фільтра дозволяє згладити швидкі зміни сигналу та зменшити вплив вимірювальних похибок, що позитивно впливає на регуляцію якості.

У блоці Temperature Controller виконується порівняння заданого та виміряного значень температури, внаслідок чого формується сигнал порушення. На основі цієї похибки регулятор генерує керуючий вплив, який спрямований на мінімальний. В цілому, дана структура реалізує принцип

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 84   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

автоматичного регулювання за відхиленнями, де керуючий вплив формується на основі різниць між заданими та фактичними значеннями, регульованими класичними величинами. Це дозволяє забезпечити стабільну підтримку температурного режиму в умовах змінного теплового навантаження та зовнішнього буріння.

Нарисунку 3.12 представлено відображено графічно динаміку основних енергетичних параметрів роботи теплового насоса в часовій області, що дозволяє оцінити ефективність функціонування системи в умовах змінного теплового навантаження.

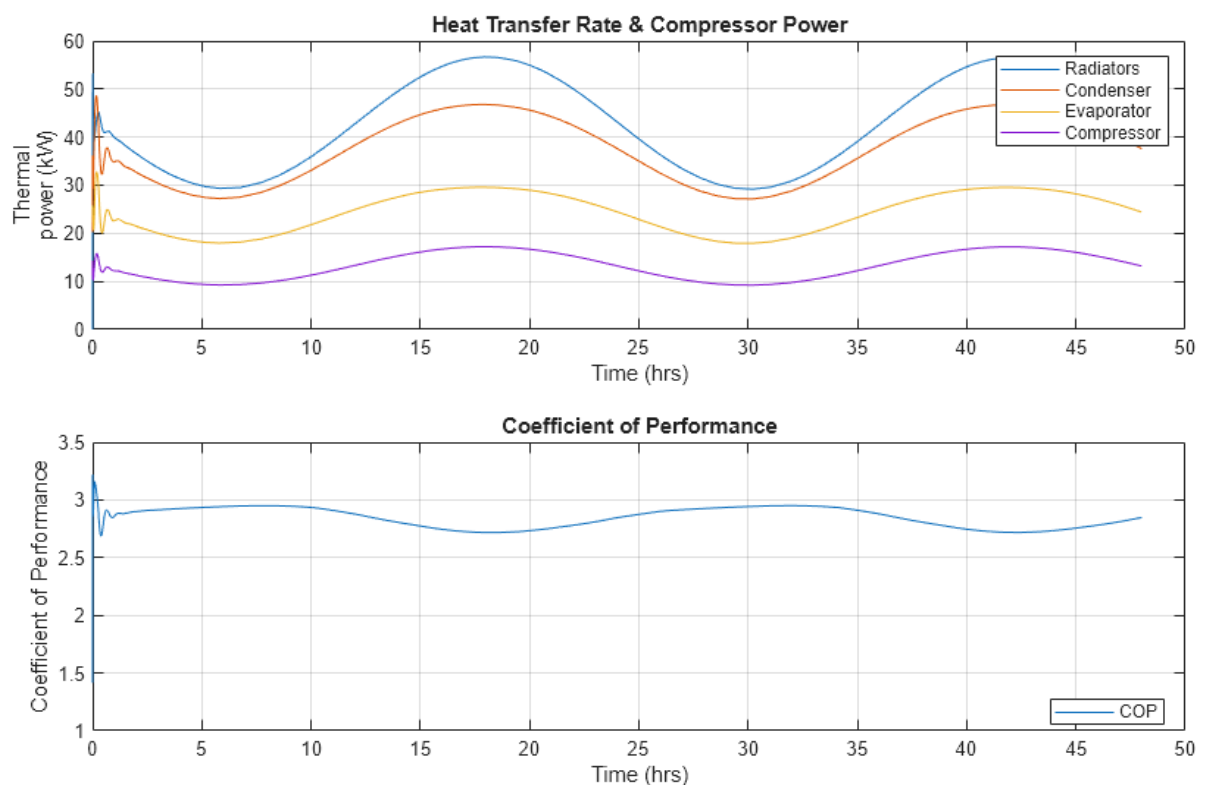


Рисунок 3.12- Динаміку основних енергетичних параметрів роботи теплового насоса

Верхній графік (рисунку 3.12) ілюструє зміни в часі теплових та енергетичних потоків у системі. наприклад, на ньому показано потужність, споживану компресором, теплову потужність, що передається в конденсаторі (яка фактично відповідає тепловому навантаженню системи опалення), а також тепловий потік у випарнику. Аналізуючи верхню піддіаграму, можна

виділити циклічний характер зміни всіх параметрів, що обумовлено добовими коливаннями температури зовнішнього середовища. При зниженні температури зовнішнього повітря посилюється теплове навантаження системи, що призводить до зростання теплового потоку в конденсаторах. Крім того, для забезпечення необхідної теплової потужності компресор працює з більшою інтенсивністю, що проявляється у збільшенні споживаної електричної потужності. Одночасно з цим змінюється і теплова потужність

Аналіз нижньої кривої рисунку 3.12. показує що його значення залишається досить стабільним протягом усього періоду моделювання, змінюючись у вузькому сегменті. Незначні коливання коефіцієнта перетворення зумовлено зміненою температурою навколишнього середовища, яка впливає на ефективність роботи теплового насоса.

Таким чином, при зниженні температури зовнішнього повітря ефективність теплового насоса дещо зменшується, що пов'язано з ускладненням процесу відбору тепла з навколишнього середовища. Водночас при підвищенні температури зовнішнього середовища незначне зростання COP, що виробляється про більш сприятливі умови роботи систем.

Таким чином, отримані графічні дані підтверджують, що енергоспоживання теплового насоса залежить від систем теплового навантаження, яке, у свою чергу, поза зовнішніми кліматичними умовами. При збільшенні теплового навантаження зростає і споживана потужність компресора, тоді як при зниженні навантаження енергоспоживання знижується.

У процесі моделювання також реалізовано підсистему оптимізації роботи насосних груп, яка забезпечує регулювання витрат теплоносія та підтримання заданих температур у контурах. Це досягається за допомогою ПІД-регуляторів, які відповідають критеріям якості перехідних процесів (швидкодія, перерегулювання, статична помилка).

Окрему увагу приділено моделюванню аварійних ситуацій. У Simulink це реалізується через блоки порівняння та логічні умови, які відслідковують

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 86   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

критичні параметри (перегрів, наявність циркуляції, відмова обладнання). У разі спрацювання аварійного сигналу система переходить у безпечний режим, що відповідає логіці, закладеній в UML-моделі.

Результатом розробки є імітаційна модель, яка дозволяє досліджувати динаміку температури в системі, оцінювати ефективність використання джерел тепла, а також проводити оптимізацію параметрів регуляторів. Проведення серії експериментів у Simulink дає можливість вибрати оптимальні режими роботи системи, зменшити енергоспоживання та підвищити загальну ефективність гібридної системи опалення.

Таким чином, створена Simulink-модель є інструментом для верифікації алгоритму управління, дослідження перехідних процесів та обґрунтування вибору структури системи автоматизації, що забезпечує її практичну цінність при проектуванні реальних теплоенергетичних установок.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 87   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

## ВИСНОВКИ

За результатами виконання кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження гібридних систем опалення на основі теплових насосів з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності та економічної доцільності їх впровадження.

У роботі здійснено аналіз існуючих систем опалення, що застосовуються в Україні, та визначено їх основні переваги та недоліки. Встановлено, що традиційні системи, зокрема газові котли, характеризуються залежністю від вартості енергоресурсів та низькою екологічною ефективністю. Проведений аналіз теплоенергетичних схем теплових насосів показав їх значний потенціал для підвищення енергоефективності системи теплозабезпечення. Окрему увагу приділено дослідженню інтеграції теплових насосів із відновлюваними джерелами енергії, що дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати та підвищити автономність системи.

Виконано детальний аналіз теплових насосів як ключового елемента гібридної системи опалення. Обґрунтовано вибір типу теплового насоса з урахуванням кліматичних умов експлуатації. Також досліджено склад та функціональне призначення основних компонентів гібридної системи, зокрема буферної ємності, насосних, теплообмінників групи та допоміжних джерел тепла. Проведений аналіз пристроїв показав доцільність використання автоматизованої системи управління, що забезпечує адаптивну роботу системи залежно від змін зовнішніх умов та теплового навантаження.

Проведено розрахунок математичної моделі гібридної системи опалення, яка враховує теплові баланси, характеристики обладнання та зовнішні впливи. На основі проведених досліджень розроблено алгоритм управління, що забезпечує раціональний вибір джерела теплової енергії з оптимальним використанням відновлюваних ресурсів. Алгоритм реалізує логіку перемикання між сонячним колектором, тепловим насосом та газовим котлом залежно від температурних умов і ефективності роботи системи.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 88   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

Для перевірки працездатності запропонованих рішень розроблено імітаційну модель у середовищі MATLAB Simulink. Моделювання дозволило дослідити динамічні режими роботи системи, оцінити енергетичні показники та підтвердити ефективність використання теплового насоса як основного джерела тепла. Отримані результати показали, що гібридна система забезпечує стабільне підтримання заданого температурного режиму при зниженні енергоспоживання та підвищенні коефіцієнтів енергоефективності.

Таким чином, у роботі досягнуто встановленої мети — розроблено ефективну гібридну систему опалення на основі теплового насоса, яка може бути рекомендована для впровадження в житловому секторі України. Запропоновані технічні рішення сприяють підвищенню енергоефективності, зниженню витрат на опалення та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 89   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чуа К. Дж. Досягнення в системах теплових насосів: огляд / К. Дж. Чуа, С. К. Чоу, В. М. Ян // Прикладна енергетика. – 2010. – Т. 87, №12. – С. 3611–3624.
2. Ван З. Сучасний стан теплових насосів для житлових будівель / З. Ван, М. Б. Лютер, М. Амірхані, К. Лю // Будівництво. – 2021. – Т. 11, №8. – С. 350.
3. Суредді Р.К. Огляд останніх досягнень у системах теплових насосів / Р.К. Суредді, Л. Лі, Х. Ву // Машини. – 2025. – Т. 13, №4. – С. 333.
4. Ван Х. Системи теплових насосів на сонячній енергії: огляд / Х. Ван, Л. Ся, Х. Чжан // Відновлювана енергія. – 2020. – Т. 146. – С. 2472–2487.
5. Валанчіус Р. Системи теплових насосів у холодному кліматі / Р. Валанчіус, Р. М. Сінгх // Енергетика. – 2019. – Т. 12, №22. – С. 4331.
6. Чжан Л. Системи теплових насосів для будівель / Л. Чжан // Відновлювана енергія. – 2015. – Т. 84. – С. 30–45.
7. Лі Х. Промислові теплонасосні системи: огляд / Х. Лі // Прикладна енергетика. – 2016. – Т. 178. – С. 800–825.
8. Чжан Х. Біфункціональні теплонасосні системи / Х. Чжан // Прикладна теплотехніка. – 2024. – Т. 257. – С. 124280.
9. Лю Дж. Останні досягнення в системах теплових насосів / Дж. Лю // Огляди відновлюваної та сталої енергетики. – 2026. – Т. 235. – С. 116944.
10. Хепбаслі А. Системи нагрівання води з тепловими насосами / А. Хепбаслі, Ю. Калінці // Відновлювана енергія. – 2009. – Т. 34, №1. – С. 163–173.
11. Ченгель Ю.А. Термодинаміка: інженерний підхід / Ю.А. Ченгель, М.А. Боулз. – Нью-Йорк: McGraw-Hill, 2015. – 950 с.
12. Інкропера Ф.П. Основи тепло- та масообміну / Ф.П. Інкропера. – Нью-Йорк: Вайлі, 2007. – 997 с.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 90   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

13. Даффі Дж. А. Сонячна інженерія теплових процесів / Дж. А. Даффі, В. А. Бекман. – Wiley, 2013. – 928 с.
14. Калогіру С. Сонячна енергетика / С. Калогіру. – Academic Press, 2014. – 760 с.
15. Кавано С. Геотермальні теплові насоси / С. Кавано, К. Рафферті. – ASHRAE, 2014. – 512 с.
16. Міжнародне енергетичне агентство. Майбутнє теплових насосів. – Париж: МЕА, 2022. – 180 с.
17. Міжнародне енергетичне агентство. Теплові насоси – відстеження прогресу в галузі чистої енергії. – Париж: МЕА, 2023.
18. Міжнародне агентство з відновлюваної енергії. Відновлювана енергія для опалення та охолодження. – Абу-Дабі: IRENA, 2020.
19. Європейська Комісія. Стратегія опалення та охолодження. – Брюссель, 2020.
20. Міара М. Порівняння технологій опалення / М. Міара // HeatPumpsWatch. – 2026.
21. Лунд Х. Роль теплових насосів в енергетичних системах / Х. Лунд // Енергетика. – 2010.
22. Конноллі Д. Розумні енергетичні системи / Д. Конноллі // Енергетика. – 2014.
23. Østergaard P. Renewable energy systems / P. Østergaard // Energy. – 2017.
24. Стаффелл І. Декарбонізація опалення / І. Стаффелл // Енергетична політика. – 2019.
25. Фраунгоферівський ІСЕ. Дослідження ефективності теплових насосів. – Фрайбург, 2022.
26. Міністерство енергетики США. Посібник з теплових насосних систем. – Вашингтон, 2021.
27. Датське енергетичне агентство. Керівні принципи щодо теплових насосів. – Копенгаген, 2020.
28. MathWorks. Документація Simulink. – 2023.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 91   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

- 29.Кляйн С. Посібник з моделювання TRNSYS. – 2017.
- 30.EnergyPlus. Інженерний довідник. – 2022.
- 31.Гнатюк Б. І. Теплотехнічні системи /Б. І. Гнатюк. – Львів, 2019. -с.247-259.
- 32.Ткаченко О. М. Альтернативні джерела енергії / О.В. М. Ткаченко. – 2021 рік. с.117-125.

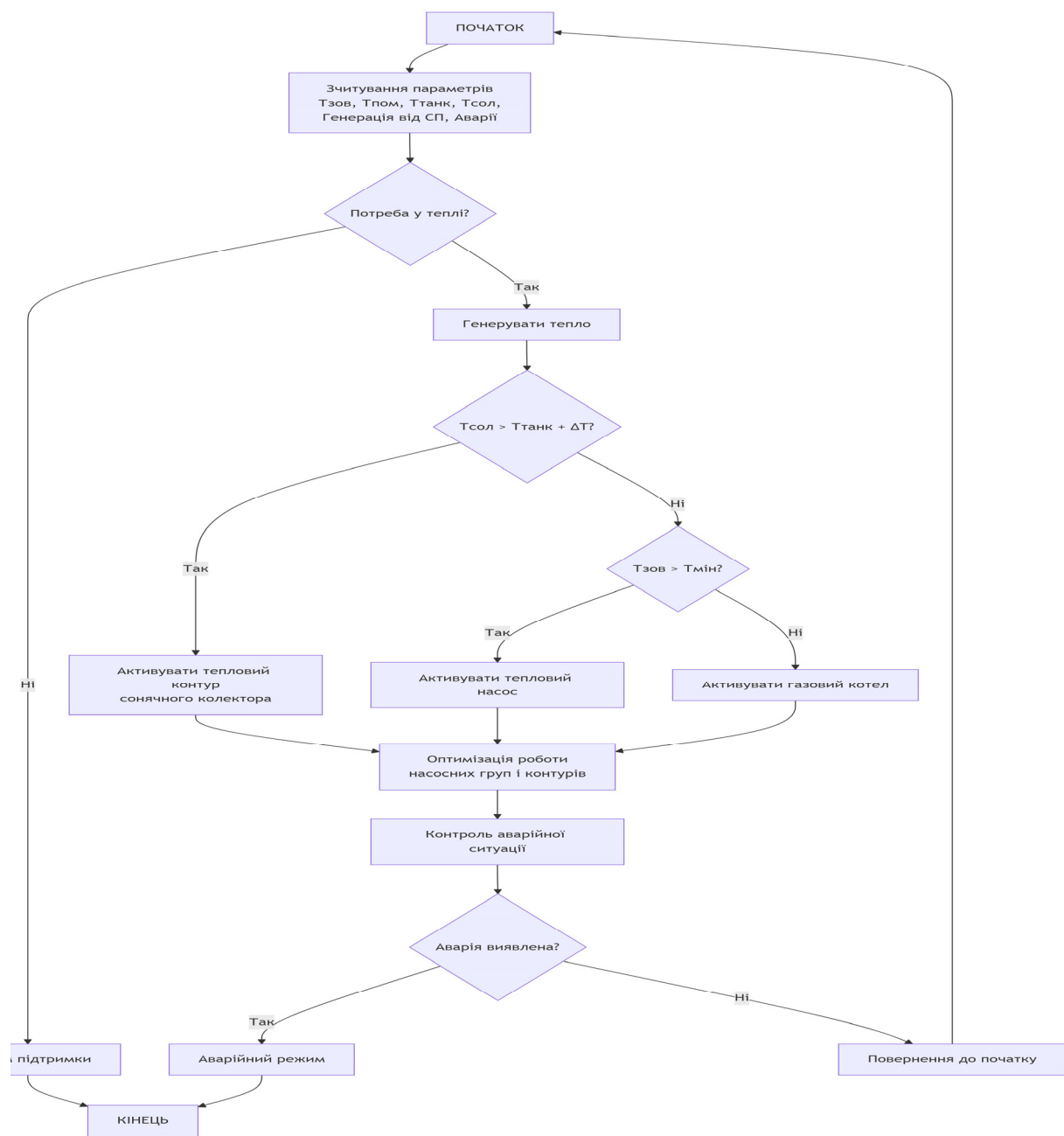
|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             | 92   |

33.

|      |      |          |        |      |                             |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ДП.АКІТ.11387779.00.0000.ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                             | 93   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                             |      |

ДОДАТОК А

UML МОДЕЛЬ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ НА ОСНОВІ  
ТЕПЛОВОГО НАСОСУ



|           |                |          |        |      |                                                                                                                           |                     |  |      |         |  |
|-----------|----------------|----------|--------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--|------|---------|--|
|           |                |          |        |      | ДП.АКІТ1138779.00.00000                                                                                                   |                     |  |      |         |  |
| Змн.      | Арк.           | № докум. | Підпис | Дата | Автоматизоване управління<br>гібридними системами<br>теплозабезпечення житлових<br>будівель на основі<br>теплових насосів | Лім.                |  | Арк. | Акрушів |  |
| Розроб.   | Бедринський М. |          |        |      |                                                                                                                           |                     |  | 93   | 93      |  |
| Перевір.  | Гуменний П.В.. |          |        |      |                                                                                                                           |                     |  |      |         |  |
| Консульт. |                |          |        |      |                                                                                                                           |                     |  |      |         |  |
| Н. Контр. | Заставний О.   |          |        |      |                                                                                                                           |                     |  |      |         |  |
| Затверд.  | Сегін А.І..    |          |        |      |                                                                                                                           |                     |  |      |         |  |
|           |                |          |        |      |                                                                                                                           | ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42/1 |  |      |         |  |



# АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

2026



*ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ГАЛИЦЬКИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ІМ. В'ЯЧЕСЛАВА ЧОРНОВОЛА  
НАДВІРНЯНСЬКИЙ КОЛЕДЖ НАЦІОНАЛЬНОГО  
ТРАНСПОРТНОГО УНІВЕРСИТЕТУ*

всеукраїнська науково-практична конференція  
***АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-  
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ***  
***(АКІТ – 2026)***

19-21 лютого 2026 року  
м. Тернопіль

Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКИТ - 2026), Тернопіль, 2026.

### **Редакційна колегія:**

Сегін А.І. - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Возна Н.Я. - доктор технічних наук, професор, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Николайчук Я.М. – доктор технічних наук, професор, академік Міжнародної академії інформатики, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету..

Яцків В.В. - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

Якименко І.З. - кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету.

Стефурак Н.А. - кандидат фізико-математичних наук, Галицький фаховий коледж імені В'ячеслава Чорновола.

Сидор А.І. - кандидат технічних наук, завідувач кафедри обчислювальної техніки Національного університету водного господарства та природокористування.

Пітух І.Р. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Яцків Н.Г. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Масляк Б.О. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Гуменний П.В. - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету

Албанський І.Б. - кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Заставний О.М. - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Західноукраїнського національного університету.

Волинський О.І. - кандидат технічних наук, доцент, Надвірнянський коледж Національного транспортного університету.

Давлетова А.Я. – викладач кафедри кібербезпеки Західноукраїнського національного університету.

### **Адреса організаторів:**

вул. Олени Теліги 8, м. Тернопіль 46003,  
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем,  
Західноукраїнський національний університет.

**Контакти:** тел.: (0352) 50-17-87, e-mail: conferenceakit@gmail.com.

**ЗМІСТ**

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Володимир АНДРУСИШИН, Ренат ДАВЛЕТОВ, Володимир КЕРНІЦЬКИЙ</b>                                            |     |
| МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ПАРКТРОНІКА                                                                         | 3 8 |
| КОМБІНОВАНОЮ СИСТЕМОЮ СВІТЛОЗВУКОВОГО ОПОВІЩЕННЯ                                                             |     |
| <b>Роман ПАЛЬЦАН, Василь ЯРЕМЧУК</b>                                                                         |     |
| АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОМИСЛОВОГО КОТЕЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ               | 13  |
| <b>Олександр СЕНЬКІВ, Андрій ГЕТЬМАН</b>                                                                     |     |
| КАСКАДНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В СКЛОВАРНІЙ ПЕЧІ                                     | 17  |
| <b>Святослав САФРОНОВ, Олександр ДОРОШЕНКО, Ігор ПІТУХ</b>                                                   |     |
| МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ                                   | 24  |
| <b>Світозар ВАСЕНКО, Степан ІВАСЬЄВ</b>                                                                      |     |
| АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВІДСТЕЖЕННЯ ДІЙ КОРИСТУВАЧА НА ОСНОВІ РЕЄСТРУ WINDOWS                                  | 30  |
| <b>Євген ПАРУБОК, Оксана СИРОТЮК</b>                                                                         |     |
| АРХІТЕКТУРА РОЗПОДІЛЕНОЇ ІОТ СИСТЕМИ ВІЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ                                | 35  |
| <b>Зеновій БОЙКО, Владислав БОЛЕХІВСЬКИЙ, Олексій ШАПОВАЛ</b>                                                |     |
| СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ТУРБОАГРЕГАТУ ТЕС                                                | 41  |
| <b>Сергій ДРОК, Максим БАГРІЙ</b>                                                                            |     |
| АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЗЕРВУАРНИМ ПАРКОМ НАФТОПРОДУКТІВ       | 45  |
| <b>Едуард МУРАДЯН, Людмила БАБАЛА</b>                                                                        |     |
| АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ                  | 51  |
| <b>Роман КРІЛЬ</b>                                                                                           |     |
| ОПТИМІЗАЦІЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ УПРАВЛІННЯ ВРАЗЛИВОСТЯМИ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ OPENVAS/NESSUS НА ОСНОВІ МОДЕЛІ P-A-R | 55  |

**Іван ЯНІК**

ГІБРИДНА МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В АЛГОРИТМІ RSA-CRT НА ОСНОВІ МОДУЛЬНОЇ АРИФМЕТИКИ ТА ЗАВАДОСТІЙКОГО КОДУВАННЯ 60

**Валентин САВЧУК, Аліна ДАВЛЕТОВА**

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ НОМЕРНИХ ЗНАКІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ 64

**Максим МИХАЛЬЧУК, Віталій КРАСІЙ**

АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ ПІРОЛІЗНОЇ УСТАНОВКИ ПЕРЕРОБКИ ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ 68

**Юрій КОЛЦУН, Віктор БОГОНІС**

АРХІТЕКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОЧИСТКИ СТИЧНИХ ВОД 72

**Андрій ОСТРОВСЬКИЙ, Назар ЛЕНИК, Дмитро КОРОБОВ, Петро ГУМЕННИЙ**

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНОЮ МІКРОВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ 77

**Наталія ВОЗНА, Ігор ПАШКОВСЬКИЙ, Сергій ЛУЦИШИН**

АДАПТИВНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ІНТЕГРОВАНИМИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ 83

**Вадим ГРАМА**

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЮ РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА БАЗІ ІoT-ТЕХНОЛОГІЙ 87

**Олег ФЕДИШИН, Людмила БАБАЛА**

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНИМИ СТАНЦІЯМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕННЯ 92

**Іван АЛБАНСЬКИЙ, Максим МЕРВА, Олександр РУДКОВСЬКИЙ, Денис СОЛТИС**

ВЗАЄМОДІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ СЕНСОРАМИ ТЕХНОЛОГІЙ ІoT 97

**Павло ГРИЦЮК**

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КІБЕРЗАХИСТУ ВЕБ-ДОДАТКІВ НА БАЗІ ВІДКРИТИХ ІНСТРУМЕНТІВ МОНІТОРИНГУ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТА АНТИВІРУСНОГО АНАЛІЗУ 103

|                                                                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Володимир БУЯР, Сергій ВОЙЦЕШКО, Оксана БУРЛАК, Наталія ВОЗНА</b>                                                |            |
| АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ                                                                         | <b>107</b> |
| <b>Володимир ШИГЕРА, Сергій МИРОНЮК, Петро ГУМЕННИЙ</b>                                                             |            |
| КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОЛІСНИМ РОБОТОМ                                                          | <b>111</b> |
| <b>Артем ГЕРАСИМЮК</b>                                                                                              |            |
| АРХІТЕКТУРА МОБІЛЬНОЇ ІоТ-МЕТЕОСТАНЦІЇ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP32                                                | <b>118</b> |
| <b>Юрій ТЕРНОВИЧ, Володимир ШАГАЛА, Олександр ЦИКВАС</b>                                                            |            |
| АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ВОДОЗАБІРНОЮ УСТАНОВКОЮ                                                          | <b>122</b> |
| <b>Станіслав БАЛАКІН</b>                                                                                            |            |
| АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ФАРБУВАЛЬНОЇ КАМЕРИ                                                    | <b>125</b> |
| <b>Петро СТИРАНКА, Олег ЗАСТАВНИЙ</b>                                                                               |            |
| АВТОМАТИЧНИЙ СКЛАД З ЛІФТОМ-ПІДЙОМНИКОМ: РОЗРОБЛЕННЯ PLC-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ                                          | <b>128</b> |
| <b>Сергій МУЗИКА</b>                                                                                                |            |
| КОНТЕЙНЕРИЗОВАНА ІОТ-ПЛАТФОРМА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ | <b>131</b> |
| <b>Максим БЕДРИНСЬКИЙ, Петро ГУМЕННИЙ</b>                                                                           |            |
| АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНИМИ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ       | <b>133</b> |
| <b>Олександр БРЕГІН</b>                                                                                             |            |
| СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН МЕТОДОМ ІМПЕДАНСНОЇ ТОМОГРАФІЇ            | <b>140</b> |
| <b>Володимир ЗЬОМКО, Наталя СТЕФУРАК, Василь КУЗИК</b>                                                              |            |
| СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ШВИДКОЇ ЗАМОРОЗКИ                                                            | <b>144</b> |
| <b>Владислав БІЛИК, Петро ГУМЕННИЙ</b>                                                                              |            |
| ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ                                   | <b>148</b> |

**Аліна ДАВЛЕТОВА**

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ЗАСОБУ ФОРМУВАННЯ МАТРИЦЬ РОЗПОДІЛУ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ **153**

**Дарина ІВАНЧИШИНА, Станіслав БОГДАНОВИЧ, Руслан ПІДГРЕБЛЯ, Андрій ПРОЦЮК**

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ У СКЛАДІ ПРОМИСЛОВОГО УСТАТКУВАННЯ **159**

**Богдан ПОЗНЯК, Ольга ПОСВЯТОВСЬКА**

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОВОЧЕСХОВИЩА **165**

**Андрій РІЖОК, Петро ГУМЕННИЙ**

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РУХУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ **171**

**Степан ІВАСЬЄВ**

МОДИФІКОВАНИЙ АЛГОРИТМ ВІДНОВЛЕННЯ ЧИСЛА ЗА ЗАЛИШКАМИ НА ОСНОВІ СКУРЧУВАННЯ МОДУЛІВ **176**

**Роман ЧІЖОВ, Петро ГУЕМНИЙ**

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ **179**

**Богдан ТОРІШНИЙ**

ЗОНАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТА ХМАРНЕ СПОВІЩЕННЯ В СИСТЕМІ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА БАЗІ ESP32 **182**

**Денис ВІВЧАР**

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СТАНУ НЕМОВЛЯТ **187**

**Артем МІСЬКІВ, Аліна ДАВЛЕТОВА**

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДОЙМ **190**

**Сергій КУЛИНА**

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ПРОМИСЛОВОСТІ В УМОВАХ СЬОГОДЕННЯ **194**

**Петро ГУМЕННИЙ**

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ, КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ **196**

**Богдан КОВБАС**

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА 201  
БАЗІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

**Андрій СЕГІН, Юрій ЛЕНЬ**

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ ЖИТЕЛІВ 204  
ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

**Ігор БЕТЛЕЙ, Василь ГАЛАСІС, Ольга РОМАНКО, Володимир ПСУЙ**

МОНІТОРИНГОВІ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ СЕНСОРІВ ІОТ ДЛЯ 210  
АВТОНОМНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ТА ПРОМИСЛОВОГО КОНТРОЛЮ

**Людмила ЯЦИНА, Марія РУДА**

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ РІДИН 214  
ТА ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Богдана ФРАНАСЮК, Вікторія САВЧЕНКО**

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 219  
ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ: ТРАДИЦІЙНІ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІ  
МЕТОДИ ПЕРЕДАЧІ ОДИНИЦЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

**Денис ТУЖЕЛЯК, Мар'ян ЧАЙКІВСЬКИЙ**

ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНИХ ЛІНІЙ 224  
ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ

2

227

1

*Максим БЕДРИНСЬКИЙ, Петро ГУМЕННИЙ*

*Західноукраїнський національний університет*

## АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНИМИ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

**Вступ.** Сучасний розвиток енергетики та житлово–комунального господарства України характеризується зростаючими вимогами до енергоефективності, екологічності та економічності систем теплозабезпечення. В умовах підвищення вартості енергоресурсів, обмеження традиційних джерел енергії та необхідності зменшення викидів парникових газів особливої актуальності надається впровадження альтернативних та відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних напрямків є використання теплових насосів у поєднанні з традиційними джерелами тепла, що формує так звані гібридні системи теплозабезпечення. Одним із ключових факторів підвищення ефективності гібридних систем є автоматизоване управління їх роботою, що дозволяє оптимізувати розподіл теплових потоків, мінімізувати витрати енергії та забезпечити стабільність функціонування системи в цілому. Використання сучасних методів керування та інформаційних технологій відкриває можливості для створення адаптивних та енергоефективних систем теплозабезпечення нового покоління.

**Мета.** Дослідження та підвищення ефективності функціонування гібридних систем теплозабезпечення житлових будівель на основі теплових насосів шляхом розробки автоматизованої системи управління.

### 1. Основна частина

Гібридні системи тепlopостачання на основі теплових насосів є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасної теплоенергетики, що обумовлено необхідністю підвищення енергоефективності, зменшення споживання традиційних енергоресурсів та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Такі системи являють собою складні інженерні комплекси, у яких тепловий насос функціонує у поєднанні з іншими джерелами теплової енергії, (рисунок 1) забезпечуючи оптимальний режим роботи залежно від зовнішніх умов, теплового навантаження та економічних факторів.

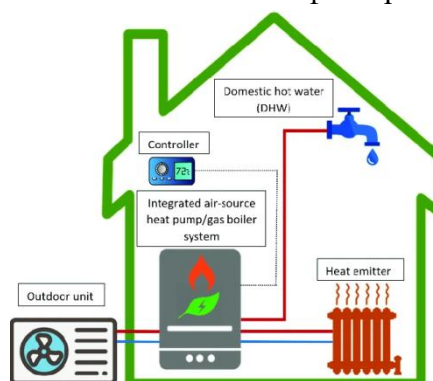


Рисунок 1.— Гібридна система опалення

Основою функціонування гібридних систем є принцип комбінованого використання різних джерел теплової енергії, що дозволяє компенсувати недоліки кожного з них. Зокрема, теплові насоси «характеризуються високою енергоефективністю, яка визначається коефіцієнтом перетворення енергії (COP), однак їх ефективність значною мірою залежить від температури джерела низькопотенційного тепла. При зниженні температури зовнішнього середовища ефективність теплового насоса зменшується, що обумовлює необхідність використання додаткових джерел тепла. Саме тому в гібридних системах широко застосовуються газові, електричні або твердопаливні котли, які забезпечують покриття пікових теплових навантажень.

Принципова побудова гібридної системи базується на структурній інтеграції декількох функціональних підсистем, кожна з яких виконує визначену роль у загальному тепловому балансі. До складу такої системи входить джерело низькопотенційного тепла, яким може бути атмосферне повітря, ґрунт або підземні води. Вибір джерела визначається кліматичними умовами, геологічними особливостями та економічною доцільністю. Наприклад, ґрунтові теплові насоси характеризуються стабільністю температурного режиму (рисунок 2), тоді як повітряні мають нижчу вартість впровадження, але більш залежні від погодних умов [1].

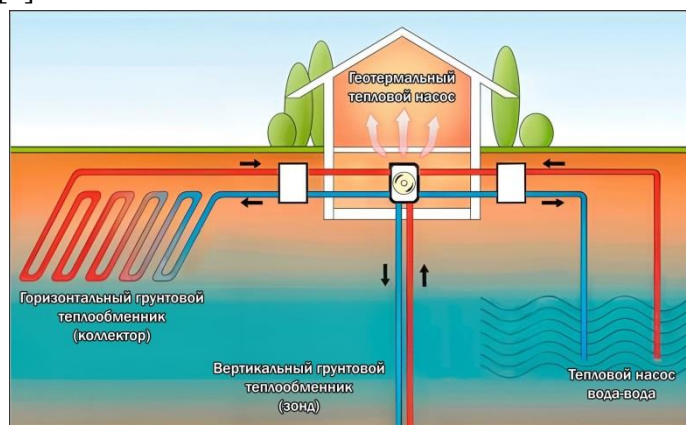


Рисунок 2– Схема роботи теплового насосу

Принцип роботи геотермальної системи теплового насоса полягає у перенесенні теплової енергії з низькопотенційного джерела, яким виступають ґрунт або підземні води, до системи опалення будівлі із використанням замкненого термодинамічного циклу. Джерелом тепла можуть бути горизонтальні ґрунтові колектори, прокладені на невеликій глибині, вертикальні свердловини із зануреними теплообмінними зондами або системи типу «вода–вода», що використовують енергію підземних вод. У всіх цих варіантах циркулює теплоносії, як правило, на основі антифризу, який здатний поглинати теплову енергію навіть при відносно низьких температурах середовища, зокрема в діапазоні  $+5...+10^{\circ}\text{C}$ .

Нагрітий теплоносії надходить до теплового насоса, де через теплообмінник передає свою енергію холодоагенту. У випарнику холодоагент, отримуючи тепло, переходить у газоподібний стан, після чого потрапляє до компресора. У процесі стискання його тиск і температура суттєво зростають, досягаючи значень, достатніх для ефективної передачі тепла системі опалення.

Далі гарячий холодоагент надходить до конденсатора, де віддає накопичену теплову енергію теплоносію системи опалення, що забезпечує нагрівання радіаторів або системи теплої підлоги. У результаті цього процесу холодоагент конденсується, переходячи з газоподібного у рідкий стан, що представлено на наступному рисунку 3 [2].

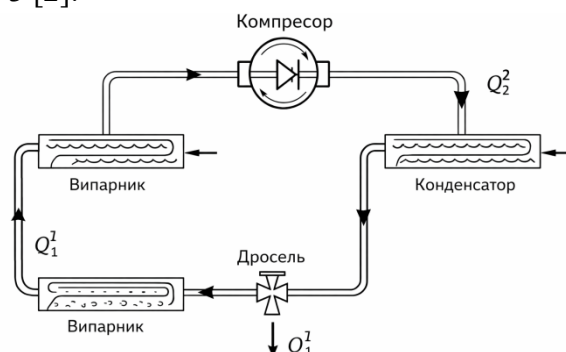


Рисунок 3. – Принципова схема термодинамічного циклу теплового насоса (компресійний цикл)

Розроблений алгоритм управління (рисунк 4) забезпечує комплексну оптимізацію роботи гібридної системи опалення, враховуючи як технічні, так і економічні фактори.

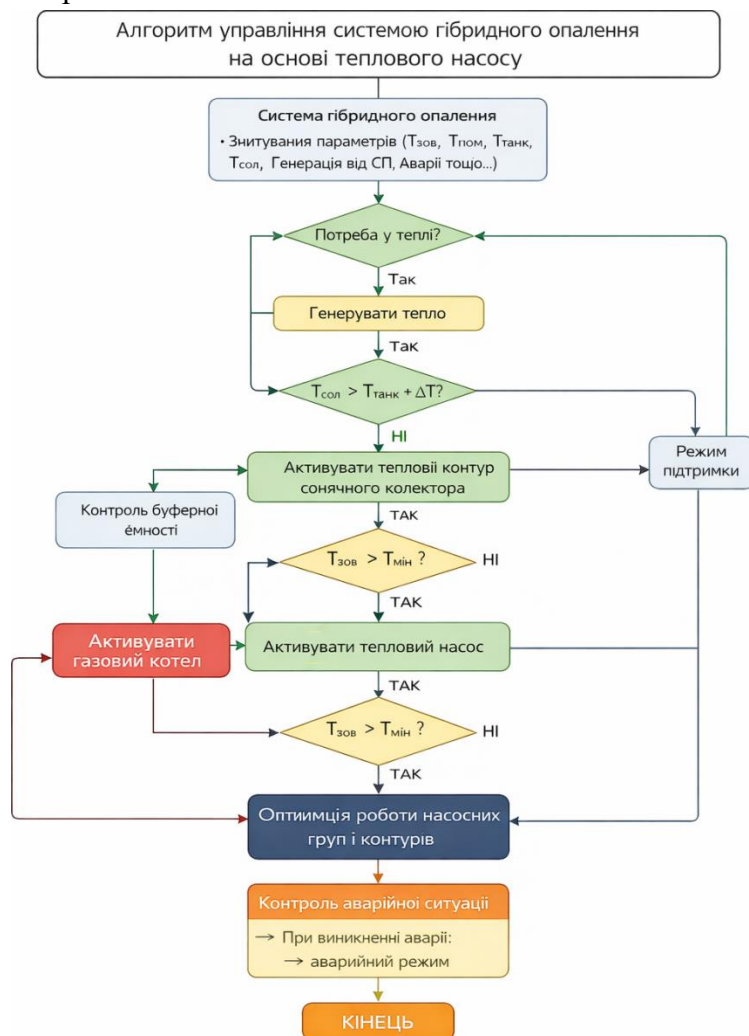


Рисунок 4. –Алгоритм управління системою гібридного опалення на основі теплового насосу

Алгоритм управління гібридною системою опалення функціонує за логікою порівняльного аналізу стану системи, визначення потреби в тепловій енергії та вибору оптимального джерела тепла з урахуванням енергоефективності, зовнішніх умов і технічних обмежень.

У разі наявності потреби у теплий алгоритм першочергово перевіряє можливість використання сонячного поля, коли активується сонячний контур, що дозволяє передавати теплову енергію до системи без додаткових витрат енергоресурсів. У цьому режимі інші джерела тепла не використовують, що забезпечує максимальну ефективність.

Якщо ж сонячної енергії роботи недостатньо, алгоритм переходить до оцінки ефективності теплового насоса. У випадку, коли температура зовнішнього повітря занадто низька і ефективність теплового насоса знижується, алгоритм передбачає включення газового котла. Його реалізація дозволяє значно знизити витрати енергоресурсів, підвищити ефективність використання відновлених джерел енергії та забезпечити високий рівень комфорту. Крім того, система набуває властивостей адаптивності та стійкості до змін зовнішніх умов, що є характерною ознакою сучасних кіберфізичних енергетичних систем.

Розробка імітаційної моделі гібридної системи опалення в середовищі MATLAB Simulink є початковим етапом дослідження, що дозволяє здійснити перевірку зовнішньої працездатності запропонованого алгоритму управління, оцінити динамічні характеристики системи та розробити ефективність використання різних джерел теплової енергії в умовах змінного навантаження та факторів.

Структурно модель складається з кількох взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких відповідає окремому функціональному елементу гібридної системи опалення. До основних підсистем належать:

- підсистема джерел теплової енергії;
- підсистема накопичення тепла (буферна ємність);
- підсистема споживачів тепла;
- підсистема керування;
- підсистема зовнішніх впливів.

Підсистема джерел теплової енергії включає моделі сонячного колектора, теплового насоса та газового котла. Модель сонячного колектора реалізується в залежності від теплової потужності від інтенсивності сонячного випромінювання та різниці температури між колектором і теплоносієм. Тепловий насос моделюється з урахуванням коефіцієнта перетворення (COP), який залежить від температури зовнішнього середовища, що дозволяє адекватно відобразити його ефективність у різних кліматичних умовах. Газовий котел у моделі виступає як резервне джерело тепла з фіксованою або регульованою теплою потужністю [3].

Підсистема буферної ємності виконує функцію акумулювання теплової енергії та стабілізації температурного режиму системи. Вона реалізується у вигляді інтегрованої формули:

$$C \frac{dT_{tank}}{dt} = Q_{in} - Q_{out}, \quad (1)$$

де  $C$  – теплоємність буферної ємності,  $T_{tank}$  – температура теплоносія в  $Q_{in}$  – сумарний тепловий потік від джерела,  $Q_{out}$  – теплове навантаження споживачів.

Підсистема споживачів тепла включає моделі контурів опалення (радіаторного та низькотемпературного, наприклад «теплові підлоги»), які описуються через теплові навантаження, залежні від температури внутрішнього середовища та заданого температурного режиму [4].

У Simulink реалізується за допомогою блоків додаткових функцій або емпіричних залежностей.

Ключовим елементом моделі є підсистема керування, яка реалізує алгоритм, розроблений на основі UML-моделі. Вона включає логічні блоки (Switch, Relational Operator, Logical Operator), які визначають вибір джерела теплової енергії.

Для реалізації складної логіки доцільно використовувати Stateflow, що дозволяє представити систему в ряді кінцевого автомата зі станами: «очікування», «сонячний режим», «режим теплового насоса», «режим газового котла» та «аварійний режим».

Підсистема зовнішніх впливів включає змінні параметри навколишнього середовища, такі як:

- температура зовнішнього повітря;
- інтенсивність сонячного випромінювання;
- профіль теплового навантаження.

Дані можуть задаватися у вигляді сигналів часу (Signal Builder, From Workspace) або використовувати реальні експериментальні дані (рисунк 5).

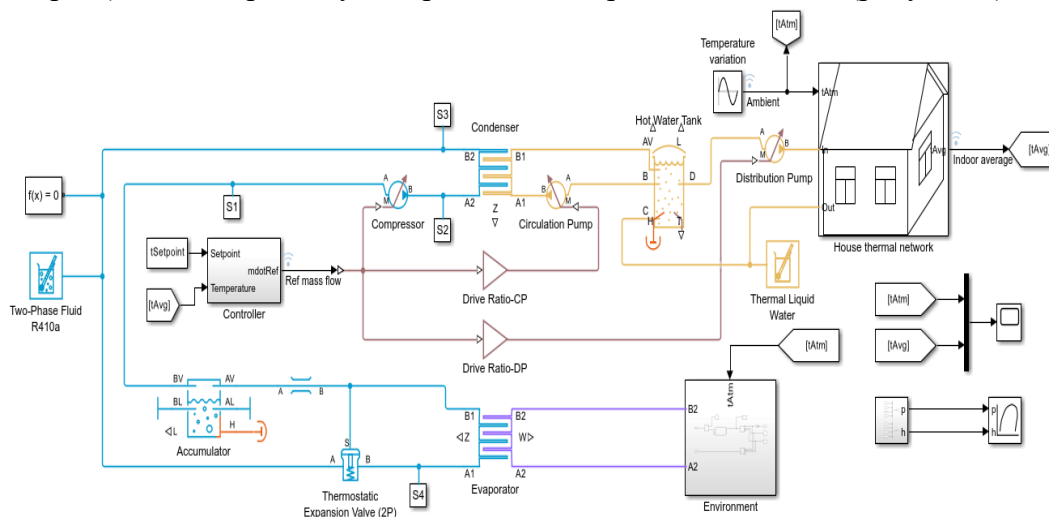


Рисунок 5 – Simulink модель гібридної системи опалення на основі теплового насоса

У розробленій схемі на рисунку 5 наведена імітаційна модель системи теплового насоса типу «повітря–вода», призначеної для опалення житлового будинку із застосуванням водяних радіаторів як елементів тепловіддачі.

Робочий цикл системи заснований на використанні двофазного холодоагенту, який відбирає теплову енергію від вологого атмосферного повітря та передає її теплоносію (воду). Холодоагент типу R410a циркулює в закритому

контурі, проходячи через конденсатор, компресор, терморегулювальний розширювальний клапан і випарник.

На рисунку 6 представлено відображено графічно динаміку основних енергетичних параметрів роботи теплового насоса в часовій області, що дозволяє оцінити ефективність функціонування системи в умовах змінного теплового навантаження.

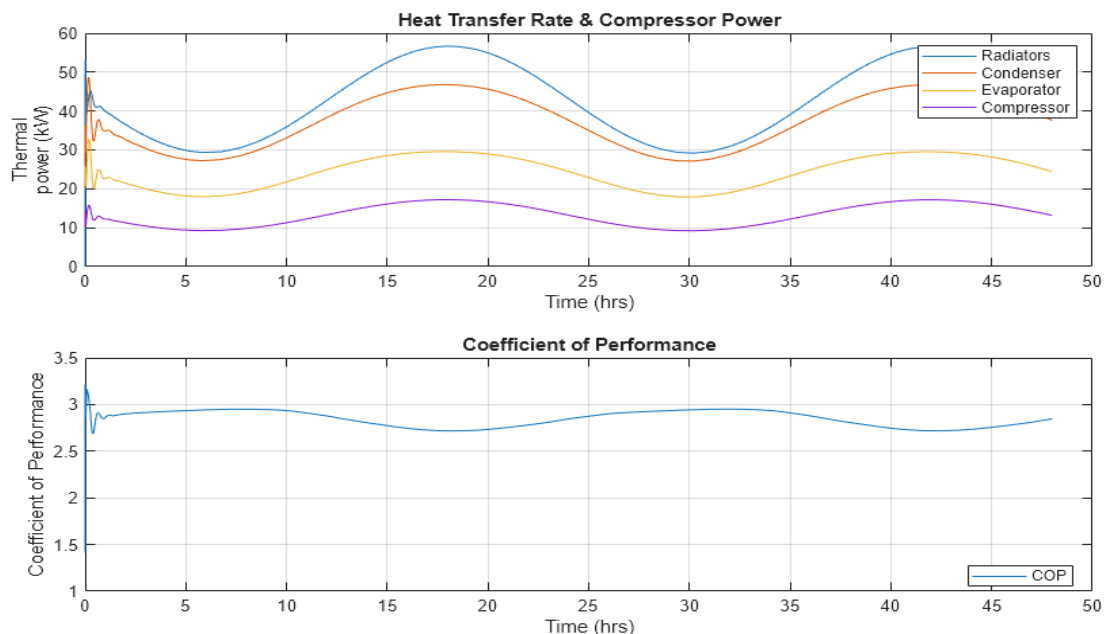


Рисунок 6– Динаміка основних енергетичних параметрів роботи теплового насоса

Верхній графік (рисунку 6) ілюструє зміни в часі теплових та енергетичних потоків у системі. На ньому показано потужність, споживану компресором, теплову потужність, що передається в конденсаторі (яка фактично відповідає тепловому навантаженню системи опалення), а також тепловий потік у випарнику.

Аналізуючи верхню піддіаграму, можна виділити циклічний характер зміни всіх параметрів, що обумовлено добовими коливаннями температури зовнішнього середовища. При зниженні температури зовнішнього повітря посилюється теплове навантаження системи, що призводить до зростання теплового потоку в конденсаторах. Крім того, для забезпечення необхідної теплової потужності компресор працює з більшою інтенсивністю, що проявляється у збільшенні споживаної електричної потужності. Одночасно з цим змінюється і тепла потужність.

Аналіз нижньої кривої рисунку 6 показує, що його значення залишається досить стабільним протягом усього періоду моделювання, змінюючись у вузькому сегменті. Незначні коливання коефіцієнта перетворення зумовлено зміненою температурою навколишнього середовища, яка впливає на ефективність роботи теплового насоса.

Таким чином, при зниженні температури зовнішнього повітря ефективність теплового насоса дещо зменшується, що пов'язано з ускладненням процесу відбору тепла з навколишнього середовища. Водночас при підвищенні температури зовнішнього середовища незначне зростання COP, що виражається про більш сприятливі умови роботи систем.

Таким чином, отримані графічні дані підтверджують, що енергоспоживання теплового насоса залежить від систем теплового навантаження, яке, у свою чергу, поза зовнішніми кліматичними умовами. При збільшенні теплового навантаження зростає і споживана потужність компресора, тоді як при зниженні навантаження енергоспоживання знижується.

**Висновок.** На основі проведених досліджень розроблено алгоритм управління, що забезпечує раціональний вибір джерела теплової енергії з оптимальним використанням відновлюваних ресурсів. Алгоритм реалізує логіку перемикання між сонячним колектором, тепловим насосом та газовим котлом залежно від температурних умов і ефективності роботи системи.

Для перевірки працездатності запропонованих рішень розроблено імітаційну модель у середовищі MATLAB Simulink. Моделювання дозволило дослідити динамічні режими роботи системи, оцінити енергетичні показники та підтвердити ефективність використання теплового насоса як основного джерела тепла. Отримані результати показали, що гібридна система забезпечує стабільне підтримання заданого температурного режиму при зниженні енергоспоживання та підвищенні коефіцієнтів енергоефективності.

Таким чином, у роботі досягнуто встановленої мети – розроблено ефективну гібридну систему опалення на основі теплового насоса, яка може бути рекомендована для впровадження в житловому секторі України. Запропоновані технічні рішення сприяють підвищенню енергоефективності, зниженню витрат на опалення та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

#### **Перелік використаних джерел**

1. Чуа К. Дж. Досягнення в системах теплових насосів: огляд / К. Дж. Чуа, С. К. Чоу, В. М. Ян // Прикладна енергетика. – 2010. – Т. 87, №12. – С. 3611–3624.
2. Ван З. Сучасний стан теплових насосів для житлових будівель / З. Ван, М. Б. Лютер, М. Амірхані, К. Лю // Будівництво. – 2021. – Т. 11, №8. – С. 350.
3. Суредді Р.К. Огляд останніх досягнень у системах теплових насосів / Р.К. Суредді, Л. Лі, Х. Ву // Машини. – 2025. – Т. 13, №4. – С. 333.
4. Ван Х. Системи теплових насосів на сонячній енергії: огляд / Х. Ван, Л. Ся, Х. Чжан // Відновлювана енергія. – 2020. – Т. 146. – С. 2472–2487.