

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

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
(повна назва інституту)

Кафедра електропостачання  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 621.31

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
освітня програма Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології

на тему: «Дослідження ефективності роботи теплових насосів для енергопостачання багатоквартирних будівель з урахуванням водорозбору»

Виконав: студент II курсу, групи ОН-з21мп

Кононенко Ігор Володимирович

(прізвище, ім'я по батькові)

(підпис)

Науковий керівник к.т.н., доц. Шовкалюк М.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Нормаконтроль к.т.н., доц. Шовкалюк М.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент Доктор філософії, ас. Яценко О.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент Кононенко І.В.

Київ – 2024 року

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

Інститут/факультет Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту  
Кононенко Ігорю Володимировичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Дослідження ефективності роботи теплових насосів для енергопостачання багатоквартирних будівель з урахуванням водорозбору»  
науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Шовкалюк М.М.,

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

затверджені наказом по університету: Наказ 5199-с від 8.11.2023

2. Строк подання студентом дисертації 8 січня 2024 року

3. Об'єкт дослідження процеси енергоспоживання та техніко-економічні показники комбінованого енергозабезпечення багатоквартирних будівель із застосуванням теплових насосів.

4. Предмет дослідження методи та засоби для оцінювання ефективності застосування теплових насосів на потреби гарячого водопостачання та опалення багатоквартирної будівлі з використанням теплового насосу та централізованого теплопостачання.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- Аналіз існуючих методів та підходів до визначення ефективності роботи теплових насосів;

- Аналіз вхідної інформації по об'єктам дослідження;

- Розробка математичної моделі, для моделювання роботи теплового насосу в залежності від вхідних параметрів;

- Застосування математичної моделі для розрахунків показників техніко-економічних характеристик роботи теплих насосів для об'єктів дослідження;

- Аналіз отриманих даних, розрахунки загального економічного ефекту, висновки;

- Розробка стартап проєкту за результатами дослідження.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій: тези на конф. "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку –РЕМС'2023". [Київ, 22-24 листопада 2023 р.] та на XV науково-техн. конф. «Енергетика. Екологія. Людина», присвячена 125-річчю КПІ [16-18 травня 2023]

8. Консультанти розділів дисертації

*Нормоконтроль*

*Шовкалюк М.М.*

9. Дата видачі завдання 1 вересня 2023 року

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Аналіз існуючих методів та підходів до визначення ефективності роботи теплових насосів	01.09.20-30.09.23	Виконано
2	Аналіз вхідної інформації по об'єктам дослідження	01.10.20-06.10.23	Виконано
3	Розробка математичної моделі, для моделювання роботи теплового насосу в залежності від вхідних параметрів	07.10.20-21.10.23	Виконано
4	Застосування математичної моделі для розрахунків показників техніко-економічних характеристик роботи теплих насосів для об'єктів дослідження	22.10.23-27.10.23	Виконано
5	Аналіз отриманих даних, розрахунки загального економічного ефекту, висновки	28.10.23-31.10.23	Виконано
6	Розробка стартап проєкту	01.11.23-06.11.23	Виконано
7	Оформлення дисертації	07.11.23-09.12.23	Виконано
8	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	10.12.23-18.12.23	Виконано
9	Передзахист МД	19.12.23	Виконано
10	Захист дисертації	15.01.24	Виконано

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

І.В. Кононенко  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

М.М Шовкалюк.  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему: «Дослідження ефективності роботи теплових насосів для енергопостачання багатоквартирних будівель з урахуванням водорозбору» містить 136 сторінок основного тексту, 46 рисунки, 32 таблиці та 42 бібліографічні найменування за переліком посилань.

### **Актуальність теми дослідження**

Актуальність використання відновлюваних джерел енергії, зокрема енергії, отриманої від зовнішнього середовища за допомогою теплових насосів для енергозабезпечення будівель, обумовлена:

- Зростанням витрат на централізоване енергозабезпечення;
- Удосконаленням технологій і зниженням вартості впровадження подібних технічних рішень;
- Активним розвитком даного напрямку в Європейському Союзі і зміною законодавчої бази в Україні для стимулювання більш широкого впровадження ТН;
- Необхідністю надійного забезпечення теплоносієм на потреби гарячого водопостачання протягом року, що призведе до зменшення застосування електробойлерів в багатоквартирних будівлях.

Важливим напрямом досліджень є розвиток методів і засобів для оцінювання техніко-економічних показників проєктів комбінованого енергозабезпечення з урахуванням різних впливових факторів, а також визначення необхідної потужності теплового насосу і об'єму теплоакумулюючого баку для досягнення оптимального строку окупності.

**Мета магістерської дисертації:** розвиток методів і засобів для оцінювання техніко-економічних показників проєктів впровадження теплових насосів для енергозабезпечення багатоквартирних будівель.

**Об'єкт дослідження:** процеси енергоспоживання та техніко-економічні показники комбінованого енергозабезпечення багатоквартирних будівель із застосуванням теплових насосів.

**Предметом дослідження є:** методи та засоби для оцінювання ефективності застосування теплових насосів на потреби гарячого водопостачання та опалення багатоквартирної будівлі з використанням теплового насосу та централізованого теплопостачання.

**Завдання дослідження:**

- Аналіз розвитку ринку теплових насосів в Україні і світі із оглядом законодавчої бази та стимулюючих програм підтримки для житлового сектору;

- Розробка моделі для можливості оцінювання технічних та економічних показників проєктів із застосуванням різних типів теплових насосів залежно від ступеня забезпечення потреб споживачів у тепловій енергії та гарячій воді та інших впливових факторів;

- Провести розрахунки за розробленою моделлю на прикладі декількох багатоквартирних будівель в різних містах України та оцінити як змінюються техніко-економічні показники за різних сценаріїв;

- Розробити стартап-проєкт.

**Методи дослідження:** аналітичні методи, системний аналіз, математичне моделювання, метод порівняльного і структурного аналізу.

**Наукова новизна** полягає в вдосконаленні процедур оцінювання техніко-економічних показників проєктів комбінованого енергозабезпечення багатоквартирних будівель з розробкою моделі, що дозволяє враховувати залежність COP роботи теплового насосу від температур зовнішнього середовища, водорозбір і температурний графік теплоносія.

**Практичне значення результатів** полягає в застосуванні розробленої математичної моделі для моделювання роботи теплового насосу з урахуванням динамічної зміни COP і водорозбору на прикладі багатоквартирних будівель в місті Києві, Костополі та Луцьку. Модель дозволяє ефективно визначити оптимальну потужність теплового насосу для об'єкту з розрахунку на оптимальну окупність, вибрати об'єм теплоакumuлюючого баку для ГВП, оцінити доцільність модернізації системи опалення. Розроблено стартап-проєкт, реалізація якого дозволить під час виконання техніко-економічних об'ґрунтувань швидко

оцінювати технічні і економічні параметри для проектів з використанням теплових насосів в багатоквартирних будівлях.

**Ключові слова:** будівля, тепловий насос, енергоспоживання, енергоефективність, моделювання, техніко-економічні показники.

## ABSTRACT

The master's thesis on the topic: "Research of the efficiency of heat pumps for energy supply of apartment buildings with regard to water distribution" contains 136 pages of the main text, 46 figures, 32 tables and 42 bibliographic references.

**Relevance of the research topic.** The relevance of using renewable energy sources, in particular energy obtained from the external environment with the help of heat pumps (HP) for energy supply of buildings, is due to

- Rising costs of centralised energy supply;
- Improvement of technologies and reduction of the cost of implementation of such technical solutions;
- Active development of this area in the European Union and changes in the legislative framework in Ukraine to stimulate wider adoption of DH;
- The need for a reliable supply of heat carrier for the needs of hot water supply (DHW) throughout the year, which will lead to a reduction in the use of electric boilers in apartment buildings.

An important area of research is the development of methods and tools for assessing the technical and economic performance of combined heat and power projects, taking into account various influencing factors, as well as determining the required heat pump capacity and heat storage tank volume to achieve the optimal payback period.

**The purpose of the master's thesis:** development of methods and tools for assessing the technical and economic performance of heat pump projects for energy supply of multi-apartment buildings.

**The object of research:** energy consumption processes and technical and economic indicators of combined energy supply of apartment buildings with the use of heat pumps.

**The subject of the research** is methods and tools for assessing the efficiency of heat pumps for the needs of hot water supply and heating of an apartment building using a heat pump and district heating.

**Objectives of the Research:**

- To analyse the development of the heat pump market in Ukraine and globally, with an overview of the legislative framework and incentive support programmes for the residential sector;

- To develop a model for assessing the technical and economic performance of projects using different types of heat pumps, depending on the degree of satisfaction of consumers' needs for heat energy and hot water and other influencing factors;

- To carry out calculations based on the developed model on the example of several multi-apartment buildings in different cities of Ukraine and assess how technical and economic indicators change under different scenarios;

- Develop a start-up project.

**Research methods:** analytical methods, system analysis, mathematical modelling, comparative and structural analysis.

**The scientific novelty** is to improve the procedures for assessing the technical and economic performance of combined heat and power projects for multi-apartment buildings with the development of a model that allows taking into account the dependence of the heat pump's COP on ambient temperatures, water consumption and the temperature schedule of the heat carrier.

**Practical purpose of the work** is to apply the developed mathematical model to simulate the operation of a heat pump, taking into account the dynamic change in COP and water consumption, on the example of apartment buildings in Kyiv, Kostopil and Lutsk. The model allows us to effectively determine the optimal heat pump capacity for the facility, the ambivalence point for optimal payback, select the volume of the heat storage tank for domestic hot water, and assess the feasibility of modernising the heating system. A start-up project has been developed, the implementation of which will allow for a quick assessment of technical and economic parameters for projects using heat pumps in multi-apartment buildings during feasibility studies, which is important for decision-making.

**Keywords:** building, heat pump, energy consumption, energy efficiency, modelling, technical and economic indicators.

## ЗМІСТ

<b>РЕФЕРАТ</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ</b> .....	<b>12</b>
<b>ВСТУП</b> .....	<b>13</b>
<b>РОЗДІЛ 1 РОЗВИТОК РИНКУ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ</b> .....	<b>16</b>
1.1 Стан справ у сфері теплопостачання та використання теплових насосів в Україні .....	16
1.1.1 Актуальність енергозбереження в Україні та пошук способів скоротити рівень енергозалежності .....	16
1.1.2 Поточний стан використання теплових насосів в Україні .....	17
1.2 Розвиток європейського ринку теплових насосів.....	20
1.2.1 Зростання попиту на ринку теплових насосів.....	20
1.2.2 Країни, які досягли найбільших успіхів у впровадженні теплових насосів	25
1.3 Законодавство ЄС щодо використання теплових насосів .....	27
1.4 Аналіз джерел генерації електроенергії в ЄС .....	29
1.5 Аналіз останніх досліджень і публікацій щодо теплових насосів у теплопостачанні.....	33
1.6 Аналіз перспектив застосування теплових насосів для багатоквартирних будівель .....	36
Висновки по розділу 1 та формулювання завдань дослідження.....	40
<b>РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИБОРУ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ</b> .....	<b>42</b>
2.1 Огляд існуючих програмних продуктів для розрахунків ТН.....	42
2.1.1 GeoT*SOL 2023 .....	42
2.1.2 Daikin altherna simulator .....	46
2.1.3 HyGCHP .....	48

2.2	Опис математичної моделі .....	53
2.2.1	Загальна частина .....	53
2.2.2	Вхідні параметри математичної моделі .....	54
2.2.3	Опис алгоритмів розрахунків для математичної моделі.....	55
2.2.4	Моделювання роботи теплового насосу в якості джерела теплової енергії на потреби ГВП та опалення будівлі .....	61
2.3	Аналіз норм споживання гарячої води для різних часових інтервалів та вибір вхідних даних для розрахунків .....	64
	Висновки до розділу 2 .....	69
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ РОЗРОБЛЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ .....</b>		<b>71</b>
3.1	Постановка задачі і опис підходів, що застосовуються.....	71
3.2	5-поверхова житлова будівля в м. Київ .....	72
3.2.1	Опис вхідних даних .....	72
3.2.2	Опис методики розрахунків, на прикладі об'єкту дослідження .....	76
3.2.3	Моделювання роботи теплового насосу в якості джерела теплової енергії на потреби ГВП та опалення будівлі .....	87
3.2.4	Моделювання сценаріїв проекту зі зміною вхідних параметрів.....	92
3.2.5	Загальні висновки за результатами моделювання .....	99
3.3	Багатоквартирний будинок на 40 квартир в м. Луцьк .....	99
3.4	ЦТП в м. Луцьк.....	103
3.5	Багатоквартирний будинок на 172 квартири з газовою котельною в м. Костопіль .....	107
3.6	Використання теплових насосів типу «грунт-вода» для автономного забезпечення житлового комплексу тепловою енергією – м. Хмельницький, містечко для переселенців.....	111
3.7	Оцінка впливових факторів на окупність проєктів встановлення теплових насосів .....	114
3.8	Додаткові глобальні переваги використання теплових насосів в системах централізованого теплопостачання .....	116
3.8.1	Згладжування піків енергоспоживання .....	116
3.8.2	Забезпечення резервного/автономного теплопостачання.....	117

3.8.3 Комбіноване використання теплових насосів з відновлюваними джерелами електроенергії .....	118
3.8.4 Непрямі економічні вигоди використання ТН для будівель .....	118
<b>4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ .....</b>	<b>121</b>
4.1 Опис ідеї проекту .....	121
4.2 Визначення характеристик-проекту .....	122
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	123
4.4 Розроблення ринкової стратегії .....	126
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	126
Висновки до розділу 4 .....	127
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>128</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>131</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

W	величина електроспоживання [кВт/год]
V	об'єм води в теплоакумлюючому баку [л]
c	теплоємність води $[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}]$
Q	теплова енергія [Вт]
k	коефіцієнт теплопередачі $[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}]$
$\lambda$	коефіцієнт теплопровідності $[\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}]$
q	питома витрата гарячої води $[\frac{\text{л}}{\text{сек}}]$
БА	бак-акумулятор гарячої води
ВДЕ	відновлювальні джерела енергії
НВДЕ	нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії
ГВП	гаряче водопостачання
ТНУ	теплонасосна установка
ТН	тепловий насос
ЗТСО	зворотний трубопровід системи опалення
COP	coefficient of performance, англ; коефіцієнт перетворення енергії
SCOP	сезонний коефіцієнт перетворення теплового насосу в режимі обігріву

## ВСТУП

### **Актуальність теми дослідження**

Актуальність використання відновлюваних джерел енергії, зокрема енергії, отриманої від зовнішнього середовища за допомогою теплових насосів (ТН) для енергозабезпечення будівель, обумовлена:

- Зростанням витрат на централізоване енергозабезпечення;
- Удосконаленням технологій і зниженням вартості впровадження подібних технічних рішень;
- Активним розвитком даного напрямку в Європейському Союзі і зміною законодавчої бази в Україні для стимулювання більш широкого впровадження ТН;
- Необхідністю надійного забезпечення теплоносієм на потреби гарячого водопостачання (ГВП) протягом року, що призведе до зменшення застосування електробойлерів в багатоквартирних будівлях.

Важливим напрямом досліджень є розвиток методів і засобів для оцінювання техніко-економічних показників проєктів комбінованого енергозабезпечення з урахуванням різних впливових факторів, а також визначення необхідної потужності теплового насосу і об'єму теплоакumuлюючого баку для досягнення оптимального строку окупності.

**Мета магістерської дисертації:** розвиток методів і засобів для оцінювання техніко-економічних показників проєктів впровадження теплових насосів для енергозабезпечення багатоквартирних будівель.

**Об'єкт дослідження:** процеси енергоспоживання та техніко-економічні показники комбінованого енергозабезпечення багатоквартирних будівель із застосуванням теплових насосів.

**Предметом дослідження є:** методи та засоби для оцінювання ефективності застосування теплових насосів на потреби гарячого водопостачання та опалення багатоквартирної будівлі з використанням теплового насосу та централізованого теплопостачання.

**Завдання дослідження:**

- Аналіз розвитку ринку теплових насосів в Україні і світі із оглядом законодавчої бази та стимулюючих програм підтримки для житлового сектору;

- Розробка моделі для можливості оцінювання технічних та економічних показників проектів із застосуванням різних типів теплових насосів залежно від ступеня забезпечення потреб споживачів у тепловій енергії та гарячій воді та інших впливових факторів;

- Провести розрахунки за розробленою моделлю на прикладі декількох багатоквартирних будівель в різних містах України та оцінити як змінюються техніко-економічні показники за різних сценаріїв;

- Розробити стартап-проект.

**Методи дослідження:** аналітичні методи, системний аналіз, математичне моделювання, метод порівняльного і структурного аналізу.

**Наукова новизна** полягає в вдосконаленні процедур оцінювання техніко-економічних показників проектів комбінованого енергозабезпечення багатоквартирних будівель з розробкою моделі, що дозволяє враховувати залежність COP роботи теплового насосу від температур зовнішнього середовища, водорозбір і температурний графік теплоносія.

**Практичне значення результатів** полягає в застосуванні розробленої математичної моделі для моделювання роботи теплового насосу з урахуванням динамічної зміни COP і водорозбору на прикладі багатоквартирних будівель в місті Києві, Костополі та Луцьку. Модель дозволяє ефективно визначити оптимальну потужність теплового насосу для об'єкту з розрахунку на оптимальну окупність, вибрати об'єм теплоакumuлюючого баку для ГВП, оцінити доцільність модернізації системи опалення. Розроблено стартап-проект, реалізація якого дозволить під час виконання техніко-економічних об'ґрунтувань швидко оцінювати технічні і економічні параметри для проектів з використанням теплових насосів в багатоквартирних будівлях, що важливо при прийнятті рішень. Отримані результати і підходи можуть бути використані і для інших об'єктів житлово-комунального господарства.

### **Апробація результатів роботи**

Основні результати за тематикою роботи обговорювалися та доповідалися на двох міжнародних конференціях:

- XV науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина», присвяченій 125-річчю КПІ [16-18 травня 2023, НН ІЕЕ КПІ, м.Київ];

- IX Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція) до 125-річчя КПІ ім.Ігоря Сікорського «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS’2023» [22 – 24 листопада 2023, НН ІЕЕ КПІ, м.Київ].

### **Публікації:**

1) Шовкалюк М.М., Кононенко І.В. Економічні показники проєктів комбінованого енергозабезпечення багатоквартирної будівлі з використанням теплового насосу та централізованого теплопостачання // Збірник матеріалів XV науково-техн. конф. «Енергетика. Екологія. Людина», присвячена 125-річчю КПІ [16-18 травня 2023] – К.: НН ІЕЕ, 2023. С.62-66. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63408>

2) Шовкалюк М.М., Кононенко І.В. Енергозабезпечення багатоквартирних будинків в новому містечку для переселенців за допомогою теплових насосів. // Збірник наук. праць IX міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS’2023». [Київ, 22-24 листопада 2023 р.] – С.138-140.

## **РОЗДІЛ 1 РОЗВИТОК РИНКУ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В УКРАЇНІ ТА СВІТІ**

### **1.1 Стан справ у сфері теплопостачання та використання теплових насосів в Україні**

#### **1.1.1 Актуальність енергозбереження в Україні та пошук способів скоротити рівень енергозалежності**

Енергозбереження в Україні – це не просто технічна або економічна проблема, а питання національної безпеки. Україна впродовж тривалого часу була сильно залежна від імпорту газу, що призводило до не тільки до економічних, а й безпекових ризиків. Під впливом цих факторів, дослідження та впровадження альтернативних джерел енергії стають ключовим моментом національної стратегії розвитку енергетики.

Першочерговими завданнями в цій галузі є розробка та реалізація програм з енергоефективності, скорочення тепловтрат у системах опалення та підвищення частки відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі країни. У цьому контексті теплові насоси виступають одним з найбільш перспективних рішень. Вони не тільки знижують споживання природного газу, а й забезпечують більшу ефективність використання електроенергії.

Пошук альтернатив російському газу стає дедалі актуальнішим через геополітичну ситуацію, що впливає на стабільність поставок і ціну на газ. Це створює додатковий імпульс для дослідження і впровадження нових технологій, включно з тепловими насосами. Також необхідно враховувати, що ціна на газ - це не тільки фінансове, а й соціальне питання, що впливає на якість життя населення. Скорочення залежності від імпортного газу може знизити соціальну напругу, пов'язану зі зростанням тарифів і погіршенням житлових умов.

Існують різні програми та ініціативи на державному та регіональному рівнях, спрямовані на енергозбереження та зниження споживання газу. Також в Україні реалізуються різні інвестиційні міжнародні проекти [1-3]. Всі вони включають у

себе різноманітні заходи: від реконструкції джерел та тепломереж до комплексної термомодернізації будівель і пільг для впровадження енергоефективних технологій, в тому числі нетрадиційних та альтернативних джерел енергії [4].

Загалом розв'язання проблеми залежності від імпорتنих енергоносіїв потребує комплексного підходу, в якому одним із ключових елементів є теплові насоси. Це не просто технологічне рішення, а й стратегічний вибір на користь енергетичної незалежності, безпеки та сталого розвитку.

Застосування теплових насосів (ТН) для опалення та гарячого водопостачання (ГВП) сприяє досягненню глобальних цілей сталого розвитку (№ 7 affordable and clean energy, № 8 decent work and economic growth; № 9 industry, innovation and infrastructure; № 13 climate action) та імплементації Європейської зеленої угоди. Однак в Україні це обладнання поки не знайшло широкого застосування, передусім, через його високу вартість.

Внаслідок повномасштабного вторгнення РФ в Україні було пошкоджено чи зруйновано значну кількість житлових та громадських будівель, постраждала критична інфраструктура, зокрема ТЕЦ, що забезпечували централізоване опалення та гаряче водопостачання. Відновлення та відбудову важливо здійснювати на засадах сталого розвитку та у співпраці з Європейським Союзом, використовуючи сучасні технології енергозабезпечення.

### **1.1.2 Поточний стан використання теплових насосів в Україні**

Ситуація з опаленням в Україні різноманітна і залежить від безлічі факторів: від типу населеного пункту (місто, село) до конкретного типу будівлі (багатоквартирний будинок, приватний будинок тощо). Однак спільною проблемою для більшості будівель є низька енергоефективність будівель, зокрема невідповідність теплотехнічних характеристик огорожень сучасним вимогам і низький рівень впровадження сучасних технологій в більшості систем опалення.

Одним із варіантів поліпшення ситуації може стати впровадження теплових насосів як на рівні окремих домогосподарств, так і в рамках централізованих систем. З їхньою допомогою можна не тільки знизити енергоспоживання, а й

поліпшити якість опалення, підвищити його автоматизацію, а також зменшити споживання електроенергії на підігрів гарячої води, у випадку, коли із-за відключень централізованого гарячого водопостачання люди користуються електробойлерами.

Також, під час впровадження теплових насосів, можлива інтеграція їх роботи з іншими джерелами енергії. Теплові насоси можуть ефективно працювати в комбінації з сонячними колекторами або вітровими генераторами, що робить систему більш надійною та ефективнішою.

Загалом, зниження споживання енергоносіїв в системах централізованого опалення - це складне завдання, що вимагає комплексного підходу. Теплові насоси являють собою одне з найперспективніших рішень цієї проблеми, поєднуючи в собі ефективність, надійність, можливість інтеграції з іншими джерелами теплової енергії, а також балансування енергосистеми.

В Україні існують нормативні документи щодо застосуванню ТН в теплопостачанні: ДСТУ Б В.2.5-44:2010, присвячений використанню теплових насосів, зокрема й для ГВП житлових будинків, дещо застарілий, та не враховує сучасних реалій.

Необхідна адаптація санітарно-гігієнічних вимог до температури гарячої води, що подається централізовано, з урахуванням особливостей роботи теплового насоса. Так, тепловий насос працює в більш оптимальному режимі, підігріваючи воду до нижчих температур, ніж 55 градусів.

Підготовка гарячої води за допомогою ТН з температурою 45 градусів збільшило б середній COP теплового насосу, скоротило б тепловтрати в системі циркуляції. Для запобігання розмноженню мікроорганізмів, зокрема легіонелли, можна раз на день (у нічний період) прогрівати воду до 55 градусів. Внесення змін у нормативно базу стосовно оптимальних режимів роботи ТН та температури теплоносія, що готується, є доцільною. Також необхідно внести роз'яснення стосовно розподілу рахунків під час споживання гарячої води, яку частково або повністю готує тепловий насос житлового будинку, що не є на балансі теплопостачальної організації.

Ринок теплових насосів в Україні перебуває на початку свого росту, але має значні перспективи зростання внаслідок перспективи усунення дисбалансу у вартості енергоносіїв, розвитку технологій і активному переходу Європейських країн на опалення тепловими насосами.

Ситуація з ринком теплових насосів в Україні на даний момент залишає бажати кращого. Частка теплових насосів у системах опалення значно менша, ніж у європейських країнах. Це пов'язано з низкою чинників, включно з:

- високою вартістю обладнання (порівняльна вартість теплогенерувального обладнання представлена на рисунку 1.1);

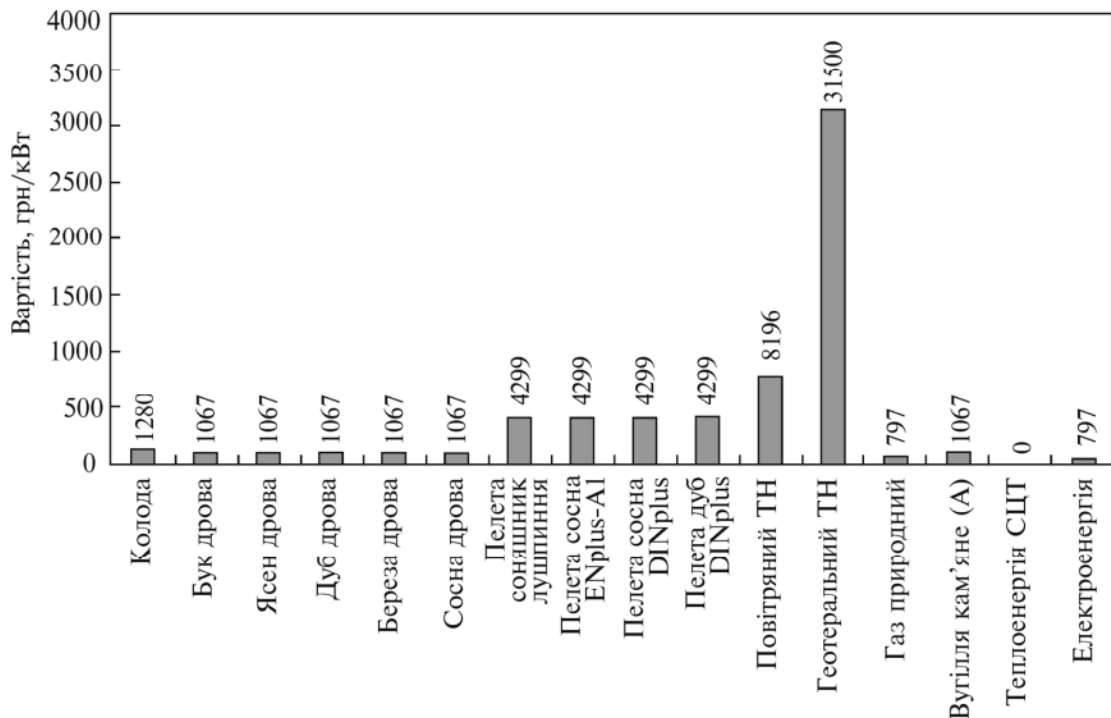


Рисунок 1.1 – Питома вартість теплогенерувального обладнання (за цінами на початок 2019 р.) [5]

- недостатньому рівню державної підтримки і державних програм;
- недостатній інформованості;
- високою інертністю в прийнятті рішень.

Однак перспективи зростання цього сегмента ринку досить обнадійливі з кількох причин.

Політичний фактор: Україна прагне знизити залежність від імпорту енергоресурсів, особливо природного газу. Теплові насоси є чудовою альтернативою традиційним джерелам енергії.

Економічний фактор: незважаючи на високі початкові витрати, теплові насоси окупаються завдяки низьким експлуатаційним витратам, тривалому строку експлуатації і енергоефективності.

Екологічний фактор: з урахуванням всесвітнього тренду до скорочення викидів CO<sup>2</sup> та інших забруднювачів, використання теплових насосів є екологічно відповідальним вибором, крім того – це дозволить покращити стан якості повітря, що є актуальною проблемою для багатьох міст в Україні, а також зниження викидів CO<sub>2</sub>, з урахуванням ринку квот на викиди CO<sub>2</sub> дає додаткові економічні вигоди.

Технологічний фактор: прогрес у галузі теплопередачі та матеріалознавства робить теплові насоси дедалі ефективнішими та надійнішими.

Соціальний фактор: зростає обізнаність населення про необхідність енергозбереження, економії енергоресурсів та використання екологічно чистих технологій. Це створює позитивний образ для теплових насосів і стимулює попит.

Інтеграція з іншими джерелами: теплові насоси можуть бути інтегровані з іншими видами відновлюваної енергії, як-от сонячні панелі або вітрогенератори, що робить систему ще більш економічно привабливою.

Всі ці фактори створюють сприятливі умови для майбутнього розвитку ринку теплових насосів в Україні [6].

## **1.2 Розвиток європейського ринку теплових насосів**

### **1.2.1 Зростання попиту на ринку теплових насосів**

Згідно з даними Eurostat, у 2019 році загальна встановлена потужність теплових насосів у ЄС становила близько 35 GWt, а кількість встановлених теплових насосів наближалася до 11 мільйонів. Ці цифри значно зросли порівняно з 2010 роком, що відображає зростаючий інтерес та інвестиції в цю технологію.

За період з 2016 по 2022 рік ринок теплових насосів у Європі значно розширився. Це зростання було зумовлене кількома факторами: посилення фокусу на екологічних технологіях, зростання цін на традиційні джерела енергії та покращення технологій теплових насосів. Динаміка продажів і загальної кількості встановлених ТН представлені на рисунку 1.2.

	<b>Sales</b>	<b>Stock</b>
2005	446 037	1.10 million
2006	502 965	1.60 million
2007	572 840	2.17 million
2008	804 457	2.98 million
2009	731 482	3.71 million
2010	788 605	4.50 million
2011	802 660	5.30 million
2012	743 883	6.03 million
2013	757 142	6.78 million
2014	791 538	7.55 million
2015	892 809	8.43 million
2016	999 682	9.41 million
2017	1.12 million	10.50 million
2018	1.27 million	11.74 million
2019	1.51 million	13.21 million
2020	1.60 million	14.77 million
2021	2.16 million	16.87 million
2022	3.00 million	19.79 million

Рисунок 1.2 – Зростання продажів і кількості встановлених теплових насосів в Європі (EU21) [7]

Технологічні інновації: одним із ключових чинників стало поліпшення технологій, адже нові моделі стали ефективнішими, що знизило вартість їх експлуатації та підвищило привабливість для споживачів.

Політична обстановка: багато країн ЄС внесли зміни в законодавчу і нормативну базу стосовно заохочення використання екологічно чистих технологій. Наприклад, у Німеччині було запропоновано субсидії та податкові пільги для встановлення теплових насосів, що привело до росту ринку теплових насосів на 28 % в 2021 році, і на 53 % в 2022-му (рисунок 1.3).

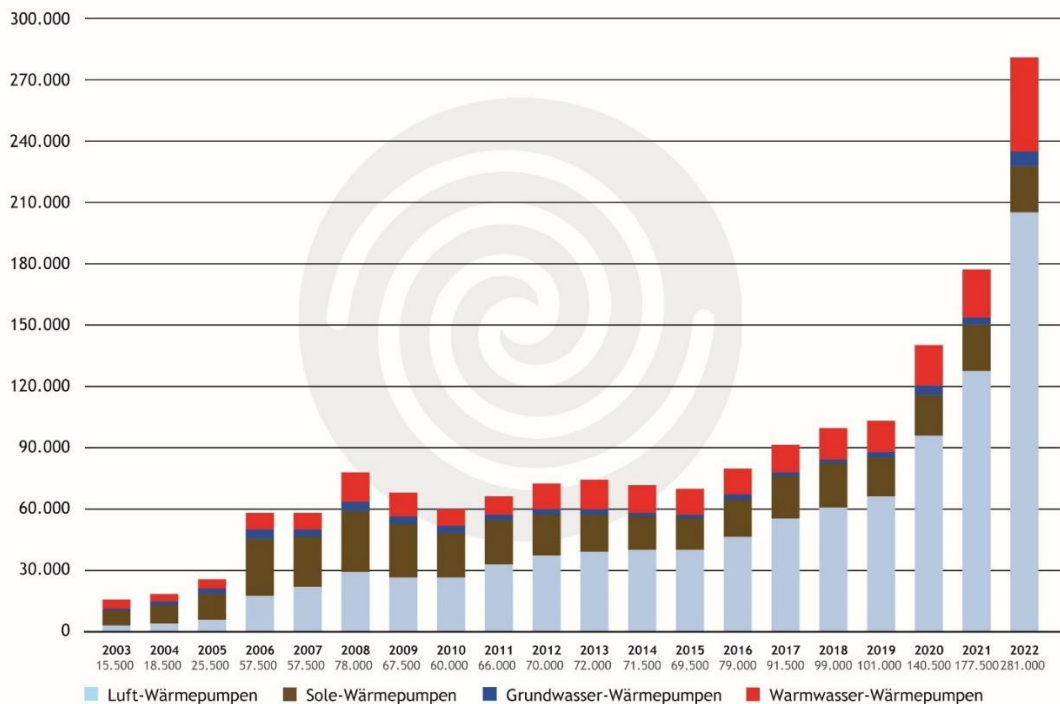


Рисунок 1.3 – Продажі теплових насосів в Німеччині за 2003-2022 роки [8]

Зростання попиту: з 2016 по 2022 роки попит на теплові насоси в Європі зростав у середньому на 10-15 % на рік (рисунок 1.4), при цьому в останні 2 роки, внаслідок ряду чинників, ріст ринку теплових насосів прискорився.

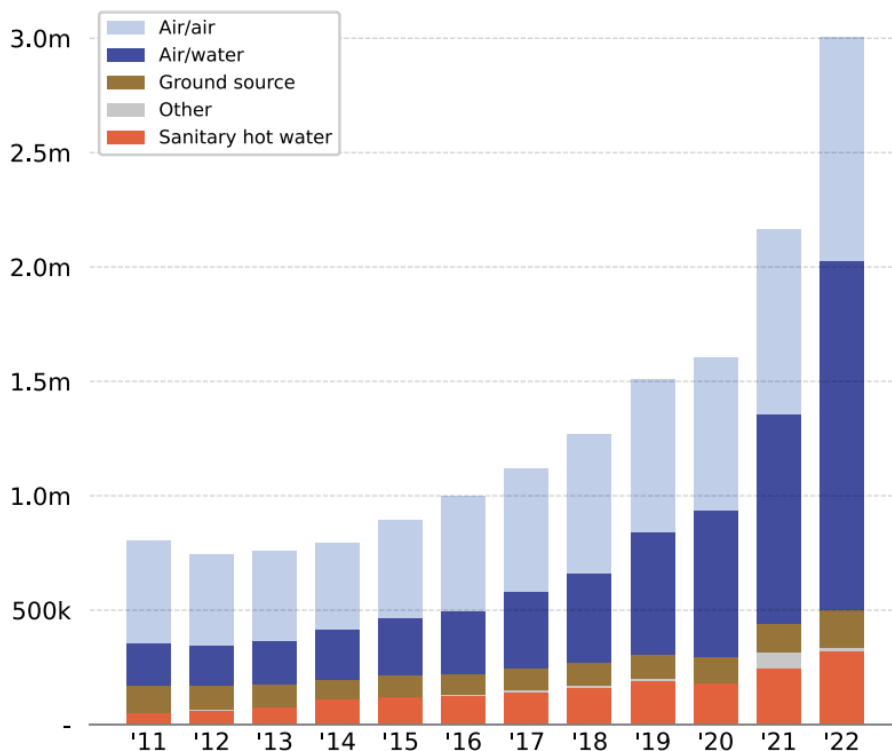


Рисунок 1.4 – Продажі теплових насосів в ЄС за категоріями, 2011-2022 р. [7]

Економічні фактори: підвищення цін на газ та електроенергію призвело до того, що альтернативні джерела енергії стали економічно привабливішими.

Інвестиції в теплові насоси почали окупатися швидше, і це стало додатковим стимулом для розширення ринку. Особливо актуальним і це питання стало після підвищення цін на газ з середини 2021 року.

Середньомісячна ціна на газ в ЄС, яку сплачують домогосподарства, виросла з середини 2021 року до кінця 2023 року – більш ніж вдвічі (рис. 1.5), незважаючи на безпрецедентні дії урядів ЄС щодо підтримки домогосподарств. Навіть з урахуванням перелому тенденції з вартістю природного газу, дана ситуація продемонструвала, що залежність від викопного палива, видобування якого в ЄС значно нижче споживання, може призводити до малопрогнозованого суттєвого росту вартості комунальних витрат, що є додатковим стимулом до переходу на теплові насоси в системах опалення: вартість електроенергії, що витрачається ними – нижче, за вартість газу для виробництва тої ж кількості теплової енергії.

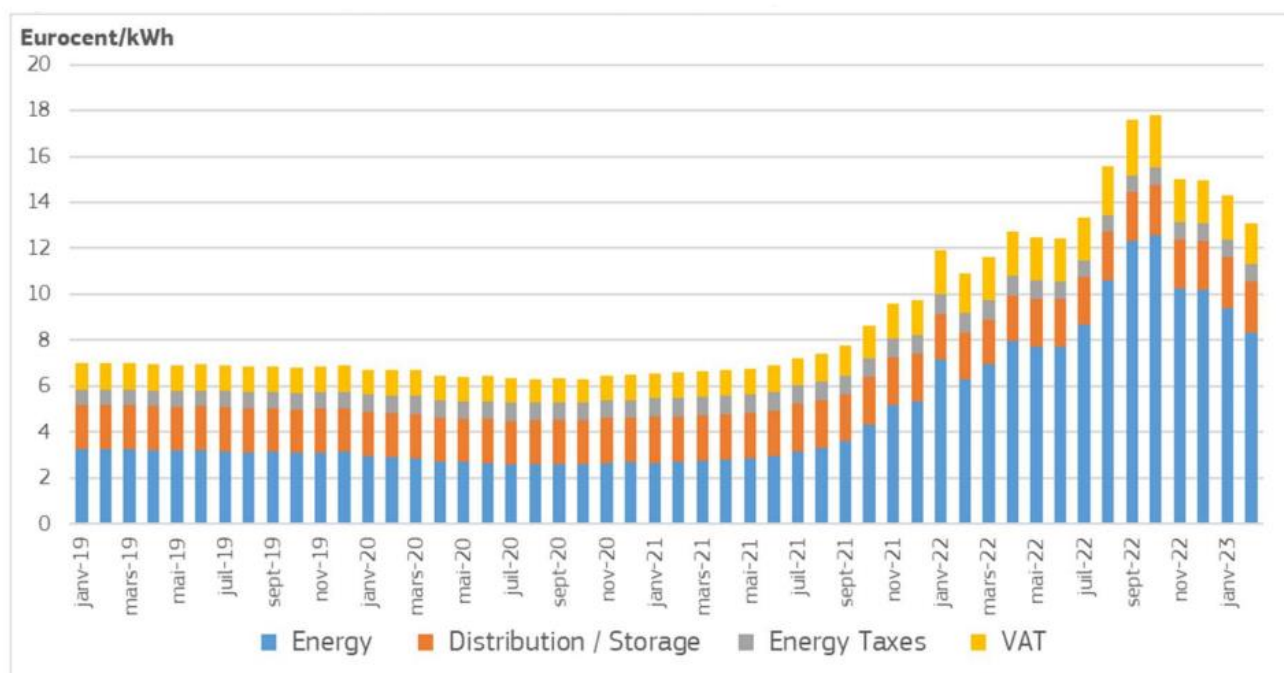


Рисунок 1.5 – Вартість електричної енергії в ЄС за останні роки [9]

Таким чином, ринок теплових насосів у Європі значно розширився за період з 2016 по 2022 роки через поєднання технологічних, політичних та економічних чинників. Ріст загальносвітового і Європейського ринку теплових насосів

приводить до пришвидшення розвитку технологій в цій галузі, напрацюванню типових інженерних рішень, схем підключення, в цілому збільшує загальну доступність теплових насосів. Це робить їх вельми привабливим варіантом і для інших країн, зокрема для України, з огляду на поточні тренди в галузі енергетики та екології.

Динаміка продажів теплових насосів у Європі за період 2016-2022 рр. свідчить про позитивні зміни на ринку. Продажі значно зросли, і це можна спостерігати як у загальних обсягах, так і у відсотковому відображенні.

Після кількох років двозначного зростання продажів 2022 рік побив новий рекорд. Продажі зросли на 38 %, в 2022 році було продано близько 3 мільйонів теплових насосів. Загальна кількість підключених теплових насосів в системах опалення в Європі наразі становить близько 20 мільйонів, приблизно в 16 % житлових і комерційних будівель Європи. Це вказує на постійний і стійкий інтерес до цієї технології. У 2016 році в Європі було продано приблизно 1 мільйон теплових насосів. До 2022 року цей показник збільшився до 3 мільйонів [10]. На рисунку 1.6 представлена інформація про продажі ТН в кожній країні в 2022 році.

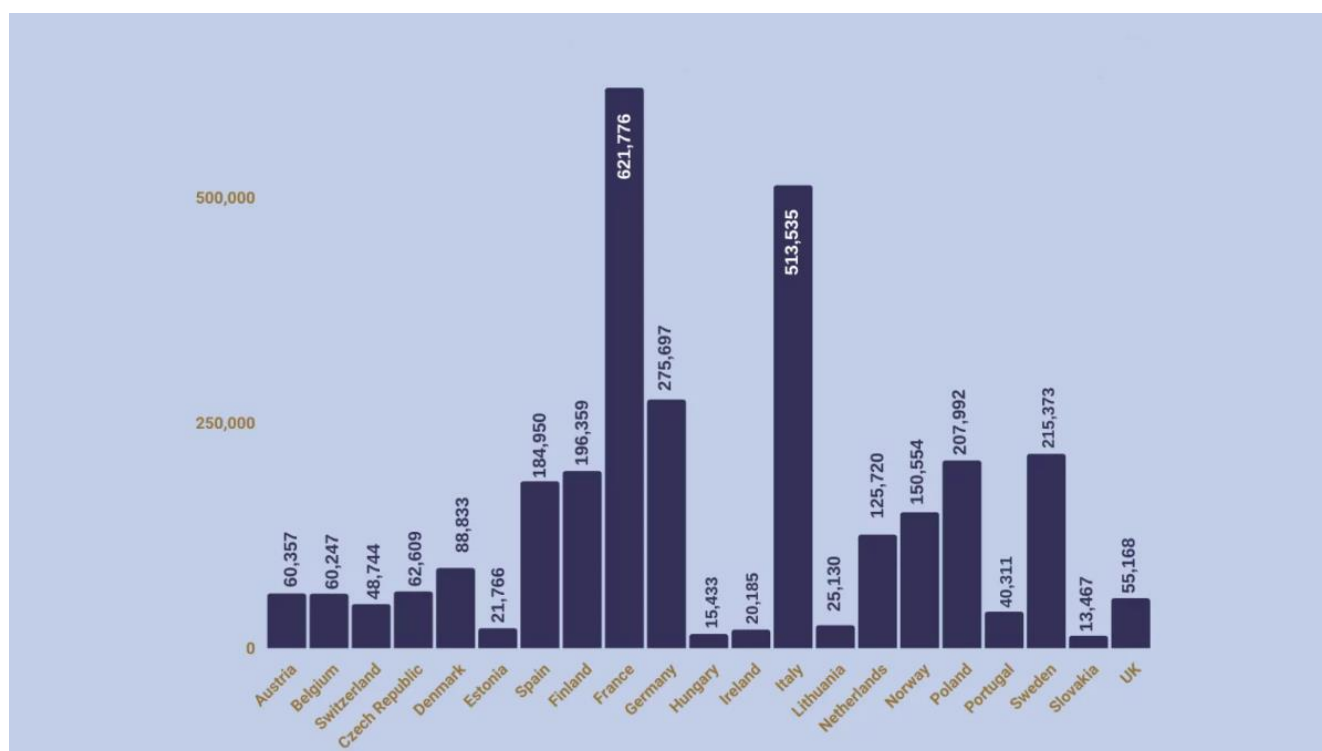


Рисунок 1.6 – Продажі теплових насосів в Європі (по країнам) в 2022 році [10]

Це зростання продажів позитивно впливає на всю індустрію, залучаючи нових виробників і урізноманітнюючи вибір для споживачів.

Цей тренд підтверджується стабільним інтересом з боку споживачів і позитивними економічними перспективами для виробників.

### 1.2.2 Країни, які досягли найбільших успіхів у впровадженні теплових насосів

Країни Європи впроваджують теплові насоси в системи опалення різною мірою. Однак, є певні лідери, які зробили значний прогрес у цій галузі, зокрема Швеція, Німеччина, Норвегія, Франція, Велика Британія.

Швеція вважається одним із піонерів у використанні теплових насосів. Країна впровадила їх ще на початку 2000-х і з 2021 року близько 90 % нових будівель вже будуються з тепловими насосами [11].

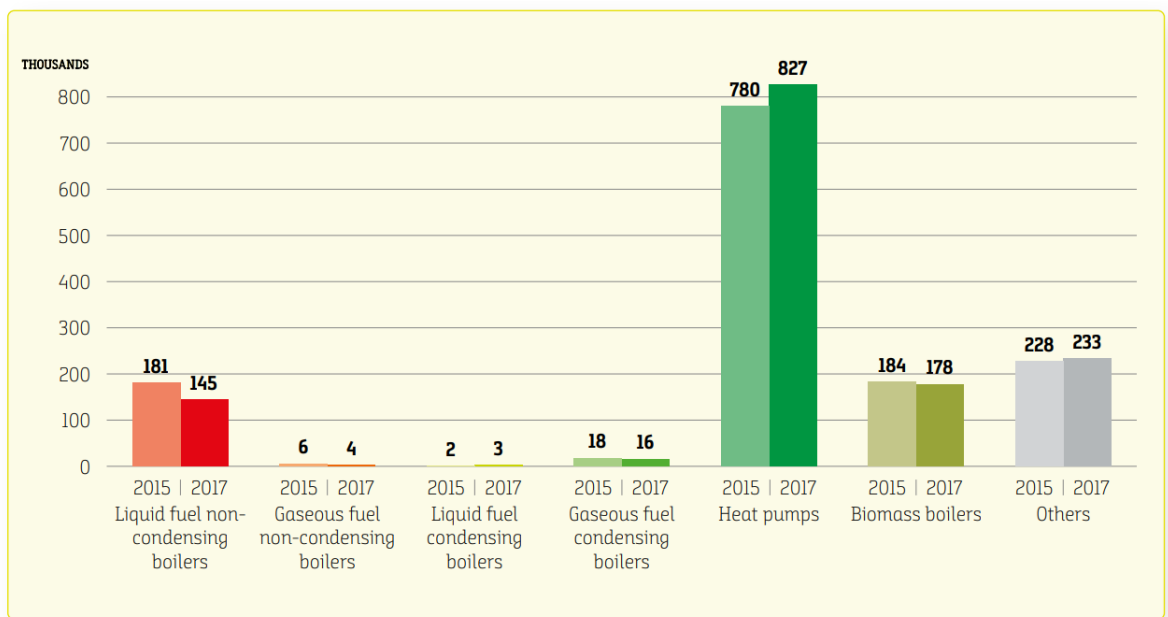


Рисунок 1.7 – Теплогенеруюче обладнання в нових будівлях в Швеції [11]

Німеччина активно впроваджує теплові насоси в рамках своєї "Енергетичної стратегії 2050", продажі зросли на 20 % у 2019 році [11], на 28 % в 2021 році і на 53 % в 2022 [8]. Норвегія активно застосовує теплові насоси для опалення житлових будинків і громадських будівель [12]. Франція розвиває власні технології теплових насосів і активно залучає інвестиції в цю сферу [11]. Попри те, що ринок

теплових насосів у Великій Британії менший, ніж в інших країнах Європи, але він демонструє активне зростання, особливо в сегменті комерційного використання [11].

Таким чином, впровадження теплових насосів у системи опалення активно просувається в багатьох країнах Європи, але особливо вирізняються Швеція, Німеччина та Норвегія. Досвід цих країн доводить економічну та екологічну ефективність теплових насосів.

У Швеції теплові насоси забезпечують близько 30 % всієї теплової енергії в країні [11]. У Німеччині цей показник значно менший і становить близько 15 % [11]. У Норвегії частка теплової енергії від теплових насосів становить приблизно 50 % [12]. У Франції цей показник становить близько 18 % [11]. У Великій Британії частка теплової енергії від теплових насосів поки що становить лише 5 % [11].

Таким чином, країни Європи активно розвивають використання теплових насосів, однак частка теплової енергії, яку ці пристрої забезпечують, сильно варіюється, що свідчить про різний рівень проникнення технології в різних країнах.

Впровадження теплових насосів у Європі має свої особливості залежно від типу будівель – приватні будинки та багатоквартирні житлові будинки.

Теплові насоси найбільш популярні в приватних будинках, особливо в країнах з холодним кліматом, наприклад, у Швеції та Норвегії [11]. Інвестиції в теплові насоси в приватних будинках, як правило, швидко окупаються завдяки ефективності технології [12]. У приватних будинках простіше провести необхідні інженерні роботи, що спрощує установку [12].

У багатоквартирних будинках процес встановлення теплових насосів складніший і вимагає узгодження з мешканцями та обліку загальних технічних систем. Через високі витрати на інтеграцію теплових насосів у багатоквартирні будинки іноді використовуються державні субсидії. Частка багатоквартирних будинків з тепловими насосами в загальній масі нижча, ніж у приватних будинків, але зростає завдяки державній підтримці.

Підходи до впровадження теплових насосів у приватних і багатоквартирних будинках значно різняться. Загалом, впровадження в приватних будинках йде

більш активно, проте зростання використання теплових насосів у багатоквартирних будинках стимулюється різними державними програмами.

### **1.3 Законодавство ЄС щодо використання теплових насосів**

Європейський Союз (ЄС) та його держави-члени активно шукають можливості для переходу на зелену енергетику та боротьби з кліматичними змінами. У цьому контексті, теплові насоси виступають як одна з ключових технологій для сталого розвитку. Вони пропонують не тільки ефективне опалення та охолодження, а й значне скорочення викидів CO<sub>2</sub>, а це відповідає стратегічним планам ЄС. Європейські документи також звертають увагу на можливість інтеграції теплових насосів з іншими поновлюваними джерелами енергії, такими як вітряна та сонячна енергія. Це робить їх надзвичайно привабливими для створення стійких енергетичних систем.

Європейський союз останніми роками активно працює над переходом до зеленої енергетики. На рівні ЄС розроблено низку документів і стратегій, як-от «Зелений курс» і «Чиста планета для всіх», які передбачають значні інвестиції в поновлювані джерела енергії.

Один із ключових документів – це «Зелений курс» (Green Deal) [13] Європейського Союзу. Ця ініціатива спрямована на забезпечення сталого розвитку, зниження викидів вуглекислого газу на 50-55 % до 2030 року та досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. У рамках «Зеленого курсу» передбачено заходи для розвитку технологій, що знижують рівень викидів парникових газів, зокрема – активізація використання теплових насосів. Мета - зробити теплові насоси доступними та ефективними для широкого кола споживачів.

Ще одним ключовим документом є стратегія «Energy Roadmap 2050» [14]. Ця стратегія також акцентує увагу на використанні поновлюваних джерел енергії та технологій з низьким рівнем викидів. Теплові насоси в цьому плані становлять інтерес як високоефективне джерело теплової енергії, яке може бути інтегроване з іншими поновлюваними джерелами, такими як вітряна і сонячна енергія.

Важливо зазначити, що кожна країна-член ЄС розробляє свої національні плани та стратегії, де передбачаються заходи для стимулювання використання теплових насосів. Наприклад, Німеччина в рамках своєї "Енергетичної стратегії 2050" пропонує фінансові стимули для встановлення теплових насосів у приватних будинках і багатоквартирних будівлях. Італія пропонує субсидії та податкові пільги для стимулювання використання цієї технології. Франція в рамках плану «Plan Climat» [15] також надає фінансову підтримку для встановлення цих систем. У рамках переходу до більш екологічних систем опалення, деякі країни Європи розглядають можливість заміни традиційних котельних на теплові насоси в багатоквартирних будинках. Наприклад, у Данії існують програми для переходу багатоквартирних будинків на централізовані системи опалення з використанням теплових насосів.

Європейський Союз активно підтримує перехід на централізоване опалення з використанням теплових насосів, особливо в багатоквартирних будинках, як частину загальної стратегії «Green Deal» [13]. У країнах, таких як Швеція і Данія, вже проведено масштабні проекти з переходу на централізоване опалення багатоквартирних будинків з використанням теплових насосів. Багато країн пропонують субсидії та податкові пільги для переходу на централізоване опалення з використанням теплових насосів. У Німеччині, наприклад, існує програма KfW, яка фінансує до 30 % вартості проекту. В показано, що застосування теплових насосів у системах централізованого опалення не тільки економічно вигідне, а й допомагає знизити викиди CO<sub>2</sub> на 30-50 %.

З урахуванням наявних стратегій і технологічних можливостей, можна очікувати, що роль теплових насосів в енергетичній системі Європи буде тільки зростати. Європейські стратегічні документи вельми позитивно дивляться на теплові насоси як на засіб для досягнення кліматичних та енергетичних цілей. Їх використання видається як невід'ємна частина майбутньої стійкої енергетичної системи ЄС.

## 1.4 Аналіз джерел генерації електроенергії в ЄС

Інколи, під час обговорення впровадження масового застосування теплових насосів в експертному співтоваристві лунають сумніви щодо доцільності їхнього використання у зв'язку з тим, що теплові насоси споживають електроенергію, яка виробляється, зокрема, з викопного палива.

Ці сумніви можуть бути небезпідставними, якщо прийняти за даність три припущення:

- Більша частина електроенергії виробляється з викопного палива;
- ККД електростанцій дорівнює або навіть менше, ніж  $1/\text{COP}$  ТН;
- Збільшення встановленої потужності ТН призводить до необхідності будівництва нових електростанцій, що працюють на викопному паливі.

Фактично, у 2023 році ситуація виглядає по іншому. Для початку, розглянемо ситуацію в Європі, оскільки саме Європейські країни активно впроваджують теплові насоси та пройшли значний шлях у модернізації енергосистеми та розвитку ВДЕ.

На сайті [16] є дані щодо енергобалансу кожної країни по годинах, з відображенням внеску кожного типу генерації/електростанцій на графіку. Оцінимо можливість автономного забезпечення багатоквартирного житлового будинку гарячою водою влітку, для цього проаналізуємо дані станом на 1 липня 2023 року для деяких країн ЄС (рисунок 1.8).

Австрія: частка ТЕС на викопних джерелах близько 0 %, а більшу частину електроенергії генерують гідроелектростанції з можливістю акумулювання електроенергії, більше того, протягом дня ГАЕС ще й мали значні резерви для закачування води.

Німеччина – найбільший споживач і виробник електроенергії в Європі. У період пікової денної генерації з 58 ГВт потужності на вугілля і газ у сумі припадало менше 6 ГВт, тобто близько 10 %. Основну генерацію забезпечували в піковий період СЕС, ВЕС, меншою мірою ТЕС на біомасі та ГЕС. О 23:00 лише 7 із 42 ГВт забезпечувалося спалюванням вугілля і газу. У період мінімальної

генерації ВЕС, внаслідок слабкого вітру, о 00:00 початку дня, 16,5 з 34 ГВт вироблялося шляхом спалювання вугілля і газу.

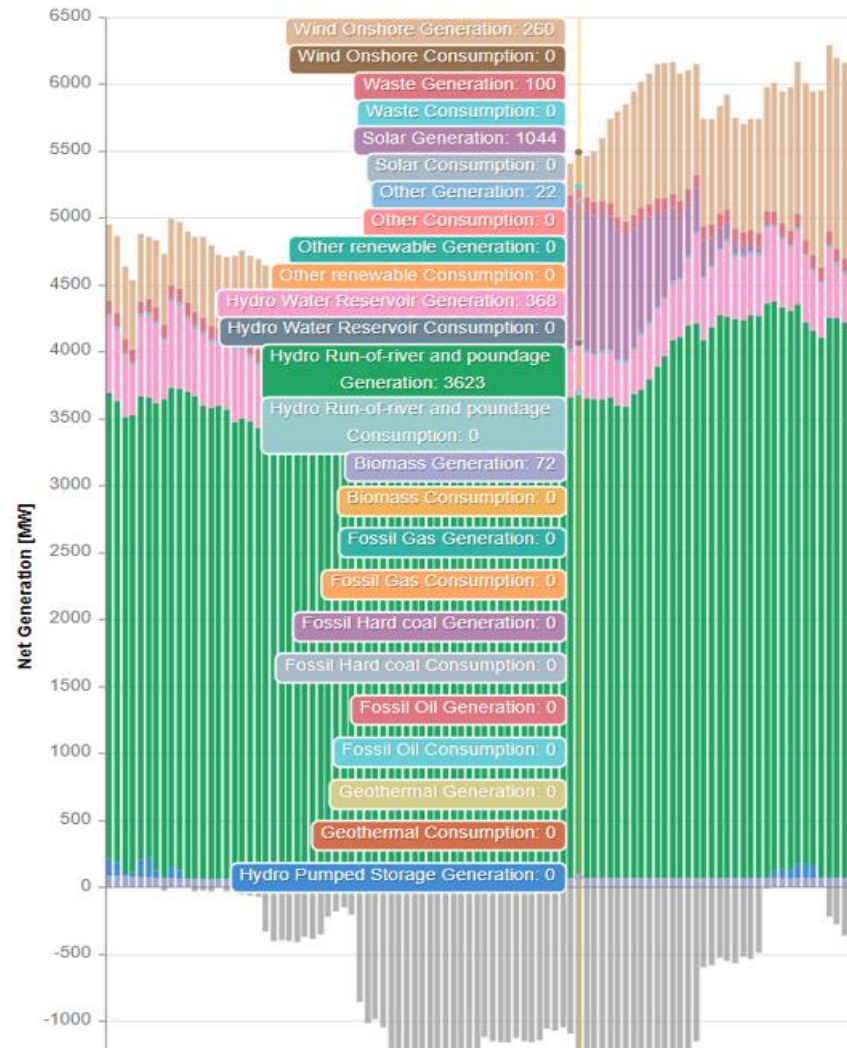
Литва – пострадянська країна, що не так давно стала активно розвивати відновлювану електрогенерацію. Як показують дані, протягом усього дня газова електростанція генерувала 44 МВт з 400-900 МВт потужності, основну частку електроенергії виробляли вітряні електростанції, на другому місці - сонячні. Румунія: протягом дня газові та вугільні електростанції виробляли близько 1,2 ГВт електроенергії, а основну частку в загальному виробництві електроенергії (7 ГВт) видавали ГЕС, АЕС, ВЕС, СЕС.

У даному дослідженні не розглядалися країни, які давно мають очевидні значні успіхи у сфері ВДЕ, як-от Данія чи Португалія, чи значні географічні переваги, що дають змогу забезпечувати всі потреби в електроенергії гідроенергетикою, як-от Норвегія. Дані моніторингу цього ресурсу показують, що і в інших країнах ситуація досить схожа.

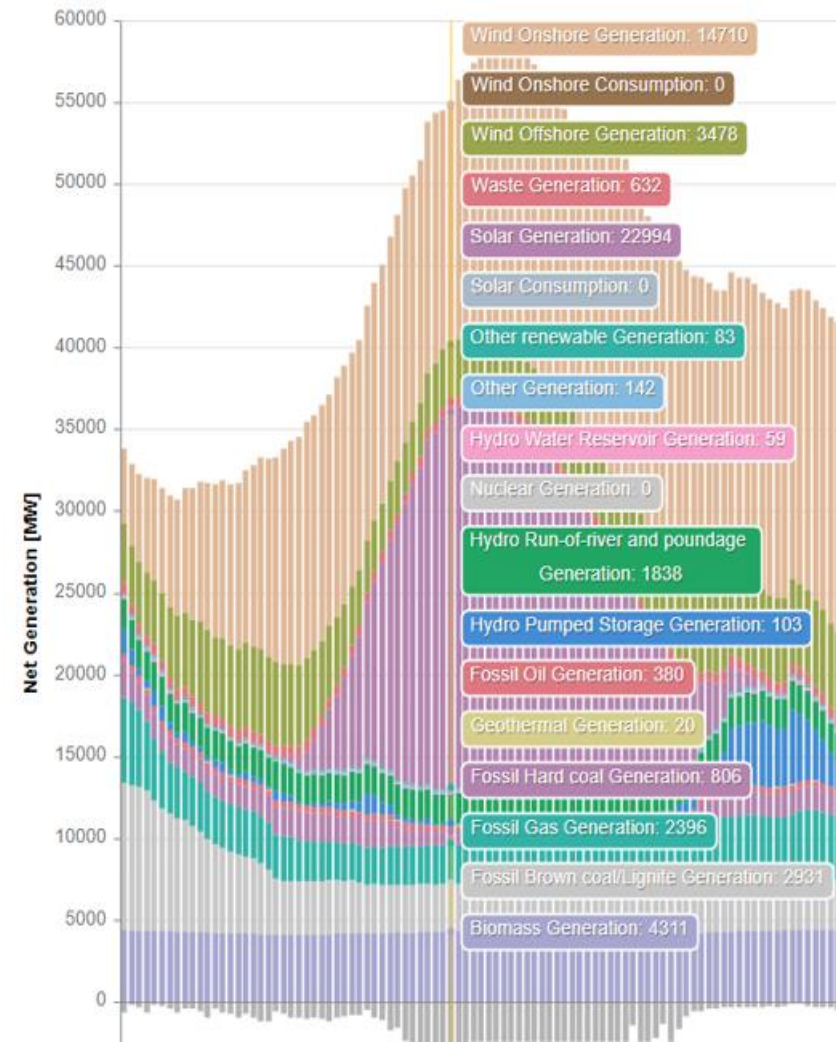
Таким чином, принаймні в літній період, з високою часткою сонячної радіації, частка вироблення електроенергії шляхом спалювання викопного палива – мінімальна.

В "опалювальний період" частка ТЕС на вугіллі та природному газі в енергобалансі - вища, але й у цей період вона не перевищує 50 % навіть у тих країнах, яким через низку причин (розмір, енергоємність економіки, відмова від АЕС, географічне положення і т.п.), складніше за інших мінімізувати використання викопного палива. Наприклад, для Німеччини 2 січня 2023 року у вечірній пік енергоспоживання 20,3 ГВт із 66 ГВт виробляється за рахунок спалювання вугілля і газу, тобто близько 30 %. Вночі, за наявності хорошого вітру, ця частка знижується до 22 %.

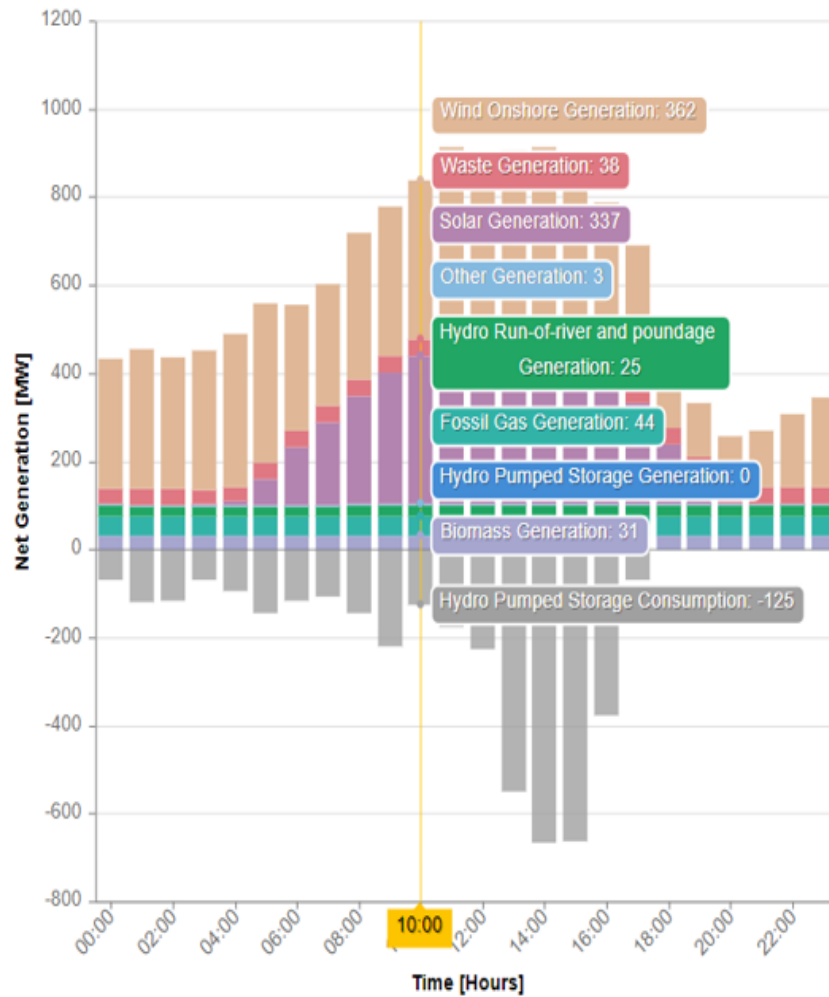
У таких країнах, як Франція, частка генерації з викопного палива тієї самої доби не перевищувала 7 %, у Румунії – 40 %, у Португалії 21 %. Список можна продовжувати, але загальна тенденція єдина: більшість країн Європи успішно реалізують програми з відмови від викопного палива, і частка його у виробленні електроенергії вже значно менша за 30-50 % навіть у зимовий період.



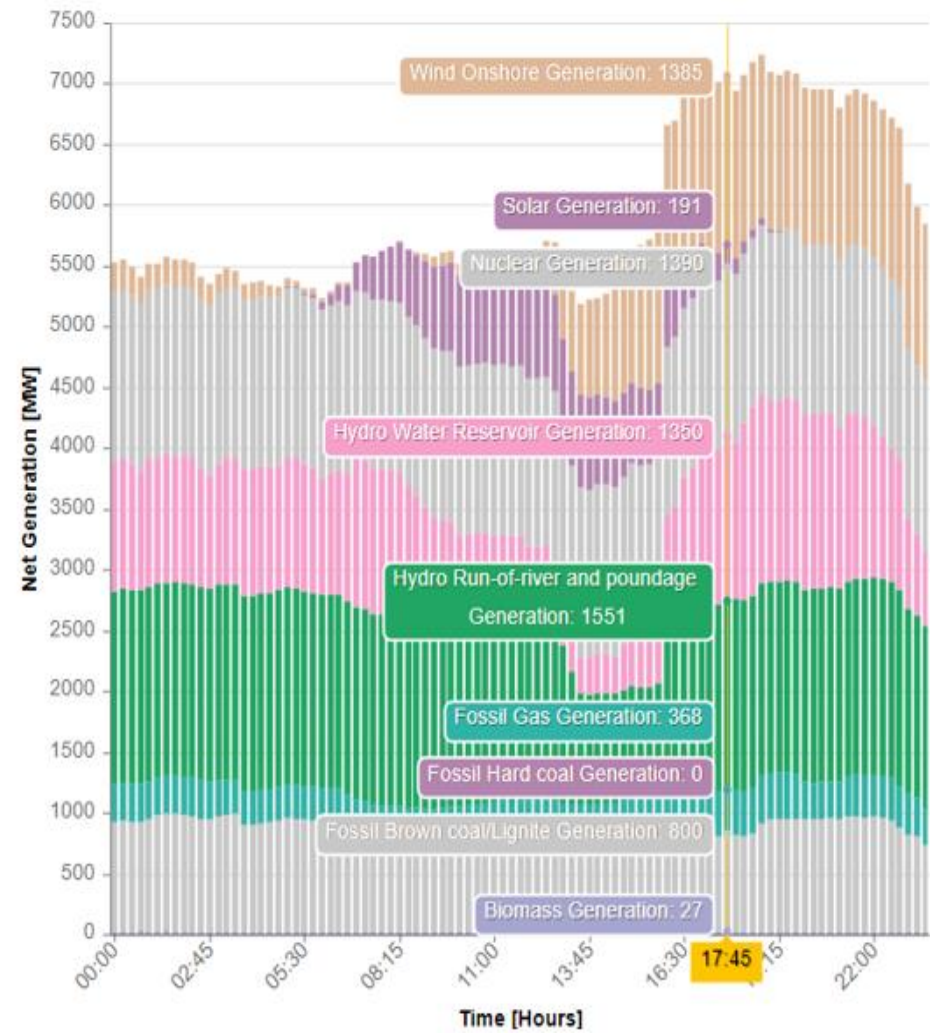
а) Австрія



б) Німеччина



в) Литва



г) Румунія

Рисунок 1.8 – Фактична генерація електроенергії за типом виробництва в країнах ЄС (станом на 01.07.2023) [16]

Для розвитку відновлюваної енергетики вкрай важливим є можливість зберігати/накопичувати енергію, а також балансувати споживання електроенергії.

Однією з найважливіших переваг теплових насосів є робота в інтеграції з системою централізованого опалення, для окремих багатоквартирних будинків – можливість під'єднання їх до "розумної" системи, яка дає змогу автоматично регулювати теплову енергію, що виробляється. Фактично, збільшення частки теплових насосів у системі опалення може стати додатковим балансувальником енергосистеми і дасть змогу як зменшити пікове енергоспоживання (і всі пов'язані з цим витрати), так і збільшувати енергоспоживання в періоди, коли електроенергії в енергосистемі надлишок, замість потреби вжиття екстрених заходів.

Крім того, одним з обмежуючих чинників у розвитку ВДЕ і збільшенні потужностей сонячних і вітряних електростанцій, є те, що за певної їхньої частки в пікові години вироблення електроенергії вони починають займати надто велику частку. По-перше, потужностей, які необхідно "розвантажувати", вже бракує, а, по-друге, зміни погоди починають вимагати дуже активного, моментального балансування.

Теплові насоси, інтегровані в загальну систему управління енергомережею, і здатні моментально вмикатися та вимикатися, дають змогу внести значний внесок у розв'язання цієї задачі, і як наслідок – ще більше збільшити встановлену потужність СЕС і ВЕС.

### **1.5 Аналіз останніх досліджень і публікацій щодо теплових насосів у теплопостачанні**

Зростання числа публікацій у фахових журналах, де тематикою досліджень є застосування теплових насосів, вказує на перспективи широкого застосування даного обладнання під час модернізації систем теплопостачання.

Для України є актуальним питанням є вибір оптимальної встановленої потужності базового та пікового теплового джерела. В [17] виконано розрахунок оптимального співвідношення встановленої потужності теплового насосу та традиційного газового водогрійного котла, а також виконано моделювання впливу

різних факторів на вибір оптимальної потужності теплових джерел для потреб опалення.

В дослідженні [18] проаналізовано сферу доцільного використання теплових насосів в Україні з урахуванням економічних реалій. Була проведена оцінка обсягів вторинних теплових енергоресурсів в металургії на рівні 27,39 млн. Гкал/рік.

В дослідженні [19] проведено аналіз термодинамічної ефективності теплонасосних схем теплопостачання і запропонована методика для визначення оптимальної глибини використання низькопотенційного тепла у випарнику теплового насоса.

В публікації [20] розглядається задача використання теплових насосів, що працюють на альтернативних джерелах енергії для опалення та гарячого водопостачання будівель. Серед висновків дослідження – витрати на енергоносії при використанні теплових насосів – в декілька разів менша, у порівнянні з витратами на централізоване опалення, роботу газових або електричних котлів аналогічної потужності, а впровадження ТН – перспективний напрямок використання альтернативних джерел енергії для забезпечення потреб будівель в тепловій енергії.

Також важливим висновком дослідження є доцільність поєднання експлуатації теплових насосів з додатковим джерелом теплоти, для покриття енергопотреб в опаленні та ГВП в сильні морози.

В публікації [21] проаналізовано можливості використання теплових насосів різних типів в енергозберігаючих технологіях, доведено, що їх використання відкриває потенціал для значного зменшення затрат енергії на опалення, враховано залежність їх ефективності від температури зовнішнього повітря.

В магістерській дисертації [22] було проаналізовано сучасний стан систем теплопостачання на базі теплових насосів та шляхи підвищення їх енергоефективності, проведена оцінка ефективності роботи повітряних теплонасосних систем з різними додатковими джерелами теплоти, запропоновано

підхід до знаходження оптимальних умов та режимів роботи теплових насосів, та їх порівняння.

У статті [23] досліджено еколого-економічні аспекти використання теплових насосів, і розглянуто базові умови їх застосування в системах централізованого теплопостачання. Запропоновано варіанти впровадження теплонасосних технологій у системи комунального теплопостачання, проаналізовано їх економічні характеристики, розраховано терміни окупності таких систем.

В публікації [24] проаналізовано перспективи застосування теплових насосів в Україні, досліджено стан ринку теплових насосів в Україні, фактори що уповільнюють їх впровадження. З аналізу результатів ексергоекономічного порівняльного аналізу традиційних і теплонасосної систем теплопостачання показано, що теплонасосна система є реальною альтернативою традиційному теплопостачанню. Запропоновано розробити детальну і ефективну програму стимулювання виробництва і впровадження теплових насосів.

В публікації [25] були розглянуті енергетичний, економічний, екологічний та соціальний фактори оцінки різних систем теплопостачання.

В магістерській роботі [26] було проведено аналіз факторів, що впливають на перспективність рішення по встановленню теплового насосу в якості джерела теплової енергії на опалення в навчальному корпусі Сумського державного університету.

В публікації [27] проаналізовані основні перешкоди до масштабного впровадження теплонасосних технологій в Україні й проведено порівняння з досвідом розвинутих країн. Серед основних перешкод зазначаються недолік цільових інвестицій, відсутність ефективного стимулювання учасників ринку, відсутність необхідних методик в нормативній базі.

Проаналізувавши наявні публікації, було визначено, що сам факт доцільності використання теплових насосів в системах теплопостачання будівель, централізованого теплопостачання – вже багато років предметом вивчення, дослідження, за результатом яких наводяться висновки, що використання теплових

насосів, як мінімум, за певних умов, наявних в Україні, є економічно доцільним, знизить споживання первинних енергоносіїв і позитивним фактором для розвитку систем теплопостачання в Україні.

Водночас, часто дослідження стосуються індивідуальних будівель, а ефективну методику для розрахунку ефективності використання теплових насосів в багатоквартирних житлових будинках ще належить розробити. Крім того, для використання теплових насосів в багатоквартирних житлових будівлях доцільно інтегрувати їх в наявну систему теплопостачання з використанням індивідуального теплового пункту, проаналізувати їх сумісну роботу.

## **1.6 Аналіз перспектив застосування теплових насосів для багатоквартирних будівель**

Застосування теплових насосів для теплопостачання багатоквартирних будинків, зокрема – для приготування гарячої води, має перспективи. Перелічимо деякі з них:

1) Сучасні теплові насоси "повітря-вода" з системою дають змогу впродовж значної частини року підігрівати воду до температури 55 градусів з коефіцієнтом 3-3,5 та вище, а використання теплового насоса для попереднього підігріву гарячої води до температур 30-40 градусів з подальшим підігрівом на теплообміннику ІТП підвищує середній SCOP до 4-5. Це призводить до значної економії первинних енергоресурсів, а з урахуванням того, що в Україні близько 70 % електроенергії виробляється на АЕС, ГЕС, СЕС, ВЕС, та існують значні перспективи подальшого зменшення частки викопного палива, можна сказати, що застосування теплових насосів – перспективний метод для економії викопного палива та використання чистої електроенергії з максимальною ефективністю.

2) Застосування теплових насосів у багатоквартирних будинках для приготування гарячої води дає змогу, за умови правильного розрахунку потужності та акумулювального бака, повністю вирішити гостру проблему "сезонних відключень гарячої води". Це, своєю чергою, є не тільки розв'язанням соціальної проблеми, а й дає змогу відмовитися мешканцям будинку від встановлення та

використання індивідуальних електробойлерів, що має багато недоліків як для мешканців (витрати на обладнання та ремонт), так і для енергосистеми України загалом (посилення вечірніх піків енергоспоживання через їх збіг з піками водоспоживання)

3) Створення робочих місць для працівників середнього та високого рівня кваліфікації, замість імпорту енергоносіїв.

4) Можливість інтеграції теплових насосів у загальну енергосистему з максимізацією використання електроенергії в періоди провалів енергоспоживання та мінімізацією в піковий період.

Задача оптимального вибору ТН для багатоквартирних будівель потребує додаткових розрахунків, техніко-економічних обґрунтувань.

Варто також згадати технічні проблеми, що виникають при встановленні теплових насосів:

1) Вибір місця під установку теплового насоса повинен забезпечувати шумовий комфорт мешканців будинку та мінімальну відстань від зовнішнього блоку теплового насоса до внутрішнього (теплообмінники в баках ГВП, що розташовуються поруч з ІТП);

2) Встановлення великогабаритних теплоакумулювальних баків зі спеціальними теплообмінниками потребує наявності додаткових площ;

3) Встановлення теплового насоса в наявних ІТП потребує спеціалізованої автоматики, а якщо йдеться про комбінування вироблення тепловим насосом тепла і для ГВП, і для опалення – додаткового монтажу теплообмінника у зворотний трубопровід опалення, обов'язкового впровадження незалежної схеми опалення, автоматики, яка налаштовується.

Впливовими параметрами в ухваленні рішення про встановлення теплового насоса є капітальні витрати та терміни окупності проєкту.

Питання окупності проєктів з використанням теплового насоса передусім залежить від правильності підбору потужності теплового насоса, теплоакумулювального бака та оптимізації режимів його використання.

Часто для розрахунку необхідної потужності теплових насосів і ємності теплоакumuлюючих баків застосовують спрощені розрахунки без системного підходу, в результаті капітальні витрати високі і проєкт у принципі не реалізовується через непривабливі терміни окупності, або він виявляється збитковим у прийнятому горизонті планування.

Проаналізовані поширені помилки під час підбору теплових насосів:

1) Тепловий насос розраховується, як єдине джерело тепла. Згідно з нормативами, система опалення має проектуватися з урахуванням "розрахункового" навантаження при  $t_{p.o.}$  (для умов м.Києва  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Фактично, середньодобові температури від  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  та вище тримаються близько 83 % діб ОП, а зовнішня температура лише 6 днів (у січні) за усі 15 років дослідження була близька до розрахункової на опалення [28]. Тому не є доцільним закладати потужність теплового насоса більшу, ніж для забезпечення будинку теплом за температур нижче ніж  $-1-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Сценаріями, за яких є необхідність у використанні ТН як єдиного джерела тепла, є наступні:

- Розташування об'єкта, що унеможлиблює зручну доставку газу/біопалива, одночасно з вкрай обмеженою підведеною потужністю електроенергії, якої вистачить для теплового насоса достатньої потужності, але не вистачить для роботи електрообігріву в піковому режимі.

- Вкрай високі вимоги до класу енергоефективності об'єкта.

2) Не враховується зміна COP теплового насоса залежно від погодних умов. Часто для розрахунку і окупності, і виробництва теплової енергії тепловим насосом, використовується показник SCOP, що вказується виробником, або умовне значення  $COP = 3,5$  (цифра варіюється).

Таке спрощення має кілька негативних наслідків:

- COP з падінням температури зовнішнього повітря знизиться, і якщо немає резервного джерела тепла, або воно недостатнє, можлива нестача теплової енергії.

- SCOP/COP може бути значно вищим, ніж вказано для роботи в нинішніх кліматичних умовах, якщо тепловий насос використовує тепло з вентиляційних шахт будинку.

3) Не враховується динамічна зміна COP теплового насоса залежно від температури середовища, що підігрівається.

Зазвичай виробник вказує в основних документах COP теплового насоса "повітря-вода" за певних параметрів зовнішнього/внутрішнього середовища, наприклад 7/35 градусів і 2/45 градусів відповідно. І в деяких проєктах використовуються ці значення під час розрахунків кількості теплової енергії, яка виробляється, що не є коректним.

Процес нагріву теплоносія/гарячої води – динамічний, і в кожному конкретний момент часу, залежно від температури довкілля та температури теплоносія, що гріється, COP теплового насоса змінюватиметься. Чим нижча температура гарячої води, підтримувана в теплоакumuлюючому баку, і чим нижча температура теплоносія в системі опалення, тим вищою буде COP теплового насоса.

Під час встановлення таких дороговартісних джерел енергії як ТН доцільно попередньо проводити утеплення будівлі з модернізацією системи опалення з уточненням необхідної площі опалювальних приладів з метою зниження температурного графіку теплоносія. Оптимізаційною задачею буде знаходження оптимального співвідношення між витратами на термомодернізацію, яка знизить необхідну встановлену потужність теплового насоса і підвищить його COP і вартість установки ТН.

Таким чином, доцільно розробити математичну модель, що буде враховувати зміни COP ТН залежно від погодних умов та зміни температур теплоносія надасть можливість розраховувати окупність теплового насоса за різних сценаріїв. За допомогою моделювання доцільно розглянути наступне:

- Порівняти, як зміниться окупність проєкту при виборі різної потужності ТН відповідно до різної частки забезпечення тепловою енергією будинку;

- Розрахувати необхідну потужність ТН для забезпечення 100 % потреб у гарячій воді влітку (наприклад, для розв'язання проблеми з плановими та "позаплановими" відключеннями ГВ);

- Провести аналіз, як будуть скорочені капітальні витрати на ТН у разі модернізації системи опалення / термомодернізації будівлі;

Саме розробленню методики коректного підбору параметрів теплового насоса і моделюванню його роботи з урахуванням змінного COP, з урахуванням усіх важливих вхідних параметрів, буде присвячено наступний розділ.

### **Висновки по розділу 1 та формулювання завдань дослідження**

В даному розділі розглянуто наявну ситуацію з розвитком використання теплових насосів в системах теплопостачання в Україні та світі.

Зокрема, проведено аналіз ринку теплових насосів і вивчено науково-практичні публікації за тематикою дослідження магістерської дисертації.

Показано, що тенденції у сфері теплопостачання з урахуванням прийнятих амбітних стратегічних планів в європейських країнах вказують на перспективи подальшого розвитку ринку теплових насосів як в ЄС, так і в Україні. Можна прогнозувати прискорений розвиток нових технологій, здешевлення теплових насосів і їх більш широке застосування для забезпечення тепловою енергією споживачів, в тому числі і багатоквартирних будинків.

Тематика застосування теплових насосів у сфері теплопостачання є надзвичайно актуальною і потребує подальших досліджень. Проведений огляд дозволив виділити раніше не досліджені в достатній мірі питання та сформулювати задачі дослідження.

Постановка задач дослідження:

1. Виконати огляд моделей розрахунків та наявних програмних продуктів для вибору ТН.

2. Побудувати математичну модель, що буде враховувати динаміку ефективності роботи теплового насоса в залежності від зміни температур

зовнішнього повітря і динаміку температур в теплоакumuлюючому баку з урахуванням водорозбору.

3. За допомогою розробленої моделі виконати моделювання параметрів роботи ТН та провести техніко-економічні розрахунки проектів комбінованого енергозабезпечення будівель.

4. Розробити стартап-проект.

Проведені дослідження будуть направлені на сприяння розвитку енергетичної інфраструктури України на засадах сталого розвитку шляхом детального дослідження можливостей ефективного застосування теплових насосів для опалення та ГВП будівель.

## РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИБОРУ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

### 2.1 Огляд існуючих програмних продуктів для розрахунків ТН

Існує ряд програмних продуктів для розрахунків проєктів з використанням теплових насосів та моделювання їх роботи.

Було розглянуто найбільш популярні і часто використовувані серед них, їх переваги і недоліки.

#### 2.1.1 GeoT\*SOL 2023

GeoT\*SOL – це передове програмне забезпечення, призначене для проєктування та аналізу геотермальних теплових насосів. Ця програма забезпечує комплексні можливості для моделювання різноманітних геотермальних систем, включаючи різні види теплових насосів, які використовують землю або воду як джерело енергії.

GeoT\*SOL відрізняється своєю здатністю точно аналізувати технічні характеристики систем, оцінюючи їх ефективність, витрати на установку та експлуатацію. Програма включає різноманітні інструменти для моделювання, що дозволяють користувачам адаптувати проєкти під конкретні умови експлуатації та вимоги.

Однією з ключових особливостей GeoTSOL є її інтуїтивний інтерфейс, який робить програму доступною не тільки для досвідчених інженерів, але й для тих, хто тільки починає працювати з геотермальними системами. Це робить GeoTSOL цінним інструментом у галузі проєктування та аналізу енергетичних систем, здатним задовольнити потреби як навчальних, так і професійних проєктів.

Серед схем відключення теплових насосів відсутній варіанту з підключенням до індивідуального теплового пункту. Найбільш підходящої для цілі моделювання роботи ТН в багатоквартирному будинку обрана дана схема (рисунок 2.1).

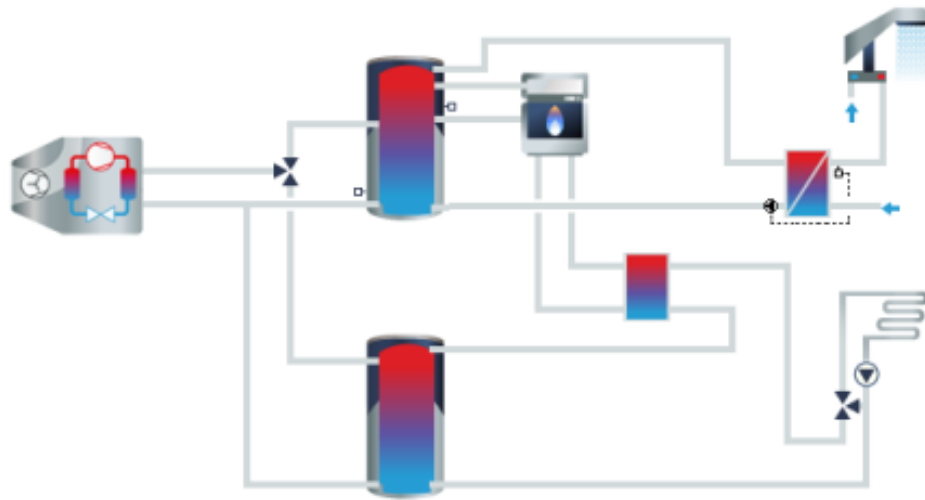


Рисунок 2.1 – Схема підключення теплового насосу в будівлі

Наступним кроком в програму вводяться температури низькотемпературної і високотемпературної зони нагріву (рисунок 2.2). При цьому, температуру низькотемпературної зони обмежено максимум 40 °С.

### Space Heating

Space heating loop

Low temp. (LT) heating loop proportion:  %

Low temperature heating loop

Supply temperature:  °C

Return temperature:  °C

High temperature heating loop

Supply temperature:  °C

Return temperature:  °C

Requirements

Heating load:  kW

Heating output (yearly total):  kWh

Heating output (monthly):

Heated useable area:  m<sup>2</sup>

Indoor temperature:  °C

Heating limit temperature:  °C

Standard outdoor temperature:  °C

Specific heating load:  W/m<sup>2</sup>

Spec. annual heat requirement:  Wh/m<sup>2</sup>

Heating output (kWh)

Month	Heating output (kWh)
January	35 251
February	31 843
March	12 153
April	0
May	0
June	0
July	0
August	0
September	0
October	0
November	33 867
December	32 750
<b>Yearly total:</b>	<b>145 864</b>

Рисунок 2.2 – Вікно програми GeoT\*SOL, для вводу вхідних даних по споживанню теплової енергії будівлею, і температурах в системі опалення

З урахуванням того, що в більшості багатоквартирних будинків температури подачі теплоносія вище 40 °С, доведеться використовувати "високотемпературний контур".

Також, в програмі немає можливості задати індивідуальний температурний графік, з температурами теплоносія для кожного місяця.

В «допомозі» ПЗ вказано: "Note: Systems that use heat pumps directly connected to the space heating loop can only be operated with LT heating, as those heat pumps cannot achieve any higher temperatures."

Тому доведеться вказувати максимальну температуру 40 °С в "низькотемпературній зоні опалення". В одному з об'єктів дослідження наявний підходящий температурний графік, де середня температура подачі СО – 40,5 градусів, проте для більшості об'єктів подібне обмеження вже не підійде.

На наступному етапі ми вказуємо потреби в ГВП будівлі:

Є можливість вказати лише середнє щоденне споживання гарячої води, що актуальне на протязі року. При цьому, фактичні дані свідчать про суттєву нерівномірність споживання гарячої води – як правило, взимку її споживається більше, ніж влітку, що пояснюється більшою потребою в гарячій воді взимку із-за низької температури холодної води

Таким чином, в розрахунки в ПЗ GeoT\*SOL буде вноситися похибка із-за неможливості врахувати помісячну зміну споживання.

Також, немає можливості задати температуру холодної води по місяцям. І тип теплоакumuлюючого баку, а від його типу суттєво залежить потенціал економії, оскільки для багатоквартирного житлового будинку доцільно використовувати баки з сепаратором, для стратифікації температур води в баку, і баки з повністю розділеними об'ємами, і окремими теплообмінниками.

Також в програмі немає можливості задати певну цифру втрат в системі циркуляції напряду, але є можливість підібрати інші параметри так чином, щоб вийти на потрібну величину.

Опції задати тепловтрати теплоакumuлюючих баків – немає.

Є можливість вибрати тип бівалентного режиму.

Є можливість задати об'єм і тепловтрати теплоакumuлюючих баків.

Є можливість задати помісячну енергопотребу в опаленні.

Результуючі дані представлені на рисунках 2.3-2.4.

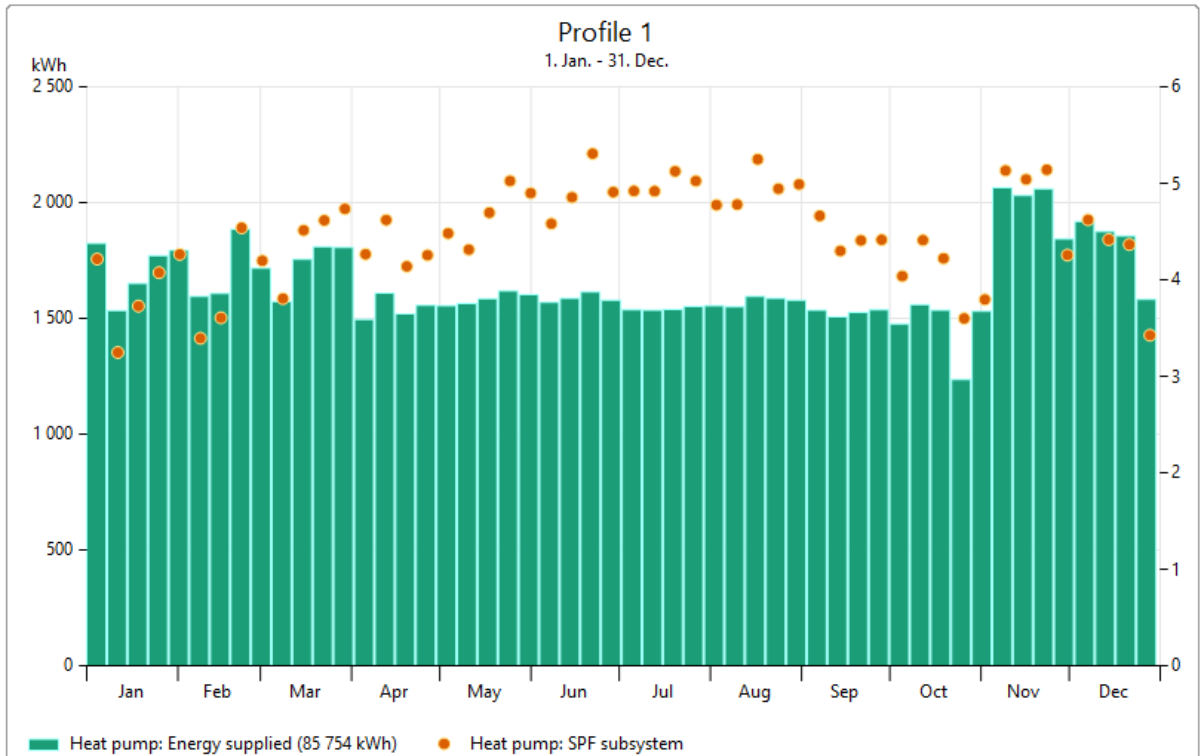


Рисунок 2.3 – Теплова енергія, що забезпечується роботою теплового насосу, і COP роботи теплового насосу

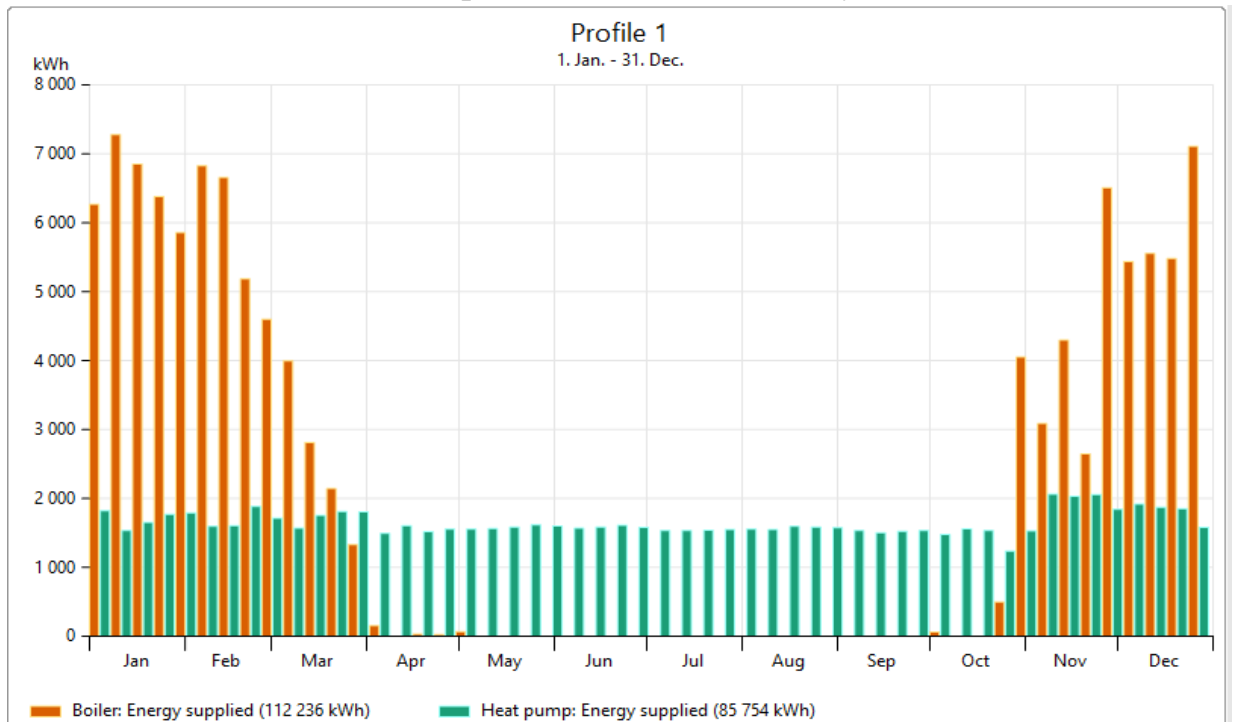


Рисунок 2.4 – Доля теплової енергії, що забезпечується тепловим насосом і газувим котлом

## 2.1.2 Daikin altherna simulator

Daikin Altherma Simulator – це спеціалізоване програмне забезпечення, розроблене компанією Daikin, для моделювання теплових насосів системи Altherma. Програма надає можливості для точного моделювання роботи цих систем, враховуючи різні параметри експлуатації. Вона дозволяє визначити ефективність системи в різних умовах, робити розрахунки потрібних потужностей та енергетичних витрат. Основною функцією програми є надання детального аналізу варіантів установки та експлуатації теплових насосів, що допомагає в проектуванні ефективних і економічних систем опалення та охолодження.

Програма дозволяє вибрати місце розташування теплового насосів, проте дані, що підтягуються по кліматології, не відповідають сучасній нормативній базі.

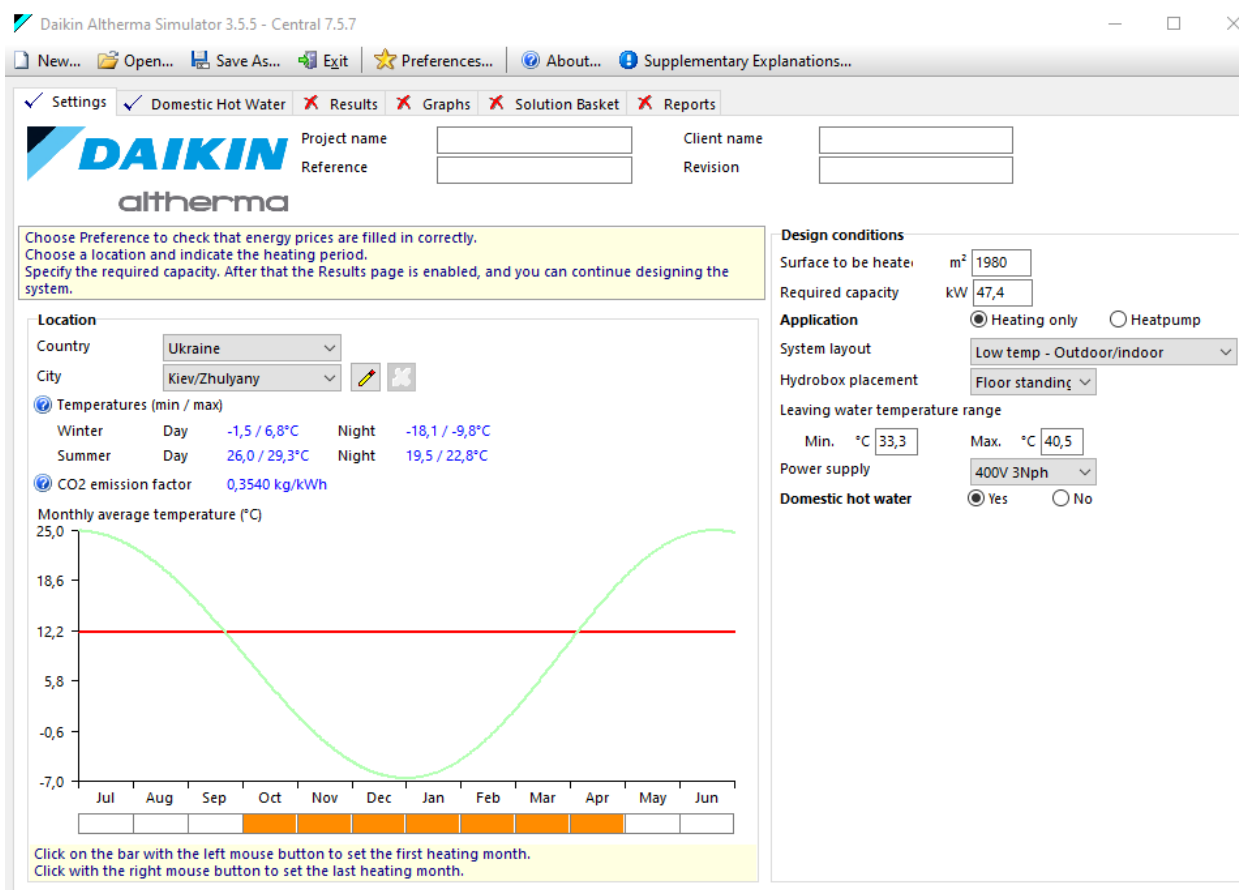


Рисунок 2.5 – Вікно програми Daikin Altherma Simulator, лист для вводу вхідних даних по характеристикам системи опалення

В програмі можна задати необхідну теплову потужність, вибрати тип системи опалення (низькотемпературна/виськотемпературна), мінімальну і максимальну температуру теплоносія.

Немає можливості створити температурний графік, чи вибрати середню температуру теплоносія для кожного місяця року.

В програмі є обмеження на розмір теплоакumuлюючого баку – 300 л (рис. 2.6), при цьому немає можливості напpямy задати кількість води, що споживається, і витрати на тепловтрати баку і циркуляцію. Споживання гарячої води в день в середньому 3872 л – задаємо через кількість використання для миття посуду. Програма перераховує 3872 л гарячої води температурою 55 градусів в 5796 л – температурою 40 градусів. При цьому, немає можливості вводу температури холодної води, і динаміки її вона зміни на протязі року.

Enter your hot water consumption on daily basis

Tapping pattern: Custom profile

Type of usage	Hot water consumption	Water temperature	Volume per day at 40,0°C	Occurrences per day
Small	3 l	40,0°C	0 l	0
Floor	3 l	40,0°C	0 l	0
Clean	2 l	55,0°C	0 l	0
Small dishwash	6 l	55,0°C	0 l	0
Medium dishwash	8 l	55,0°C	0 l	0
Larger dishwash	14 l	55,0°C	5796 l	276
Large	15 l	40,0°C	0 l	0
Shower	40 l	40,0°C	0 l	0
Bath	103 l	40,0°C	0 l	0
Total per day at 40,0°C			5796 l	202,2 kWh

Рисунок 2.6 – Вікно програми Daikin Altherma Simulator, лист для вводу вхідних даних по теплоакumuлюючому баку і споживанню гарячої води

В результатах – ні одне рішення, що пропонує програма не підходить під задані параметри. Справа в тому, що пропоновані рішення, як і загалом програмне

забезпечення – розроблено під задачу підбору теплових насосів "побутових" серій під опалення і ГВП приватного будинку (рисунок 2.7).

All data are yearly values

Sort order for calculation initial solution: Seasonal COP - descending / Spare capacity - ascending / Price - ascending

Only valid solutions

Outdoor	Indoor	Coverage HP	Cov. backup heater	Energy consumption	Energy cost	Spare capacity	SCOP
✗ ERLQ006BA	EKHVX008BB6V3	25,1%	24,1%	28120 kWh	3275 \$	-41,4 kW	1,5
✗ ERLQ006BA	EKHVX008BB6WN	25,1%	24,1%	28120 kWh	3275 \$	-41,4 kW	1,5
✗ ERLQ006BA	EKHVX008BB9WN	25,1%	34,7%	37490 kWh	4352 \$	-38,4 kW	1,4
✗ ERLQ007BA	EKHVX008BB6V3	29,4%	23,3%	28914 kWh	3366 \$	-41,4 kW	1,6
✗ ERLQ007BA	EKHVX008BB6WN	29,4%	23,3%	28914 kWh	3366 \$	-41,4 kW	1,6
✗ ERLQ007BA	EKHVX008BB9WN	29,4%	33,4%	37886 kWh	4391 \$	-38,4 kW	1,5
✗ ERLQ008BA	EKHVX008BB6V3	31,9%	22,8%	29538 kWh	3436 \$	-41,4 kW	1,6
✗ ERLQ008BA	EKHVX008BB6WN	31,9%	22,8%	29538 kWh	3436 \$	-41,4 kW	1,6
✗ ERLQ008BA	EKHVX008BB9WN	31,9%	32,7%	38291 kWh	4434 \$	-38,4 kW	1,5
✗ ERLQ011BA	EKHVH016BB6V3	35,9%	22,2%	29674 kWh	3438 \$	-36,3 kW	1,7
✗ ERLQ011BA	EKHVH016BB6WN	35,9%	22,2%	29674 kWh	3438 \$	-36,3 kW	1,7
✗ ERLQ011BA	EKHVH016BB9WN	35,9%	31,8%	38167 kWh	4403 \$	-33,3 kW	1,6
✗ ERLQ014BA	EKHVX016BB6V3	42,4%	20,9%	30791 kWh	3554 \$	-34,8 kW	1,8
✗ ERLQ014BA	EKHVX016BB6WN	42,4%	20,9%	30791 kWh	3554 \$	-34,8 kW	1,8
✗ ERLQ014BA	EKHVX016BB9WN	42,4%	29,8%	38625 kWh	4440 \$	-31,8 kW	1,7
✗ ERLQ016BA	EKHVX016BB6V3	46,7%	20,1%	31839 kWh	3666 \$	-33,7 kW	1,9
✗ ERLQ016BA	EKHVX016BB6WN	46,7%	20,1%	31839 kWh	3666 \$	-33,7 kW	1,9
✗ ERLQ016BA	EKHVX016BB9WN	46,7%	28,4%	39199 kWh	4493 \$	-30,7 kW	1,7

Рисунок 2.7 – Результати розрахунків: перелік рішень, що підходять під задані параметри

При цьому, відсутня опція задати налаштування таким чином, щоб більша частина теплової енергії надходила від стороннього джерела, а тепловий насос був лише допоміжним джерелом, для попереднього підігріву води, що догрівалась би в подальшому для потреб ГВП.

### 2.1.3 HyGCHP

HyGCHP (Hybrid Ground-Coupled Heat Pumps) – це безкоштовний інструмент моделювання, розроблений Slipstream, для аналізу гібридних геотермальних конфігурацій. Програма використовує модуль земляного теплообмінника на основі TRNSYS для дослідження як традиційних, так і гібридних систем геотермального опалення та охолодження. HyGCHP дозволяє визначити економію коштів при виборі гібридної системи, вибрати оптимальні розміри обладнання для гібридної системи, порівнювати різні підходи до гібридних геотермальних систем з точки зору енергетики та економіки.

Програмне забезпечення дозволяє вибрати одну із схем теплопостачання ґрунтовим тепловим насосом (рисунок 2.8).

Можливо задати кількість років симуляції, і крок симуляції. По замовчуванню – 10 років і 0,5 години крок.

Ground heat exchanger only

Begin by changing building loads, then make necessary changes on other input tabs.

New users click here for further instructions.

**Load file**

Building loads file "C:\HyGCHP\Building Loads\Retail\_STL.PLT"

**Simulation control**

Number of years to simulate 10 years

Time step 0.5 hours -recommended-

Рисунок 2.8 – Вікно програми HyGCHP: задання схеми системи опалення

Задаються параметри ґрунтового теплообмінника (рисунок 2.9):

- Температура ґрунту на середній глибині скважини;
- Глибина скважини;
- Відстань між скважинами;
- Параметри труб;
- Радіус скважини;
- Тепловізичні параметри ґрунту і конструкційних матеріалів.

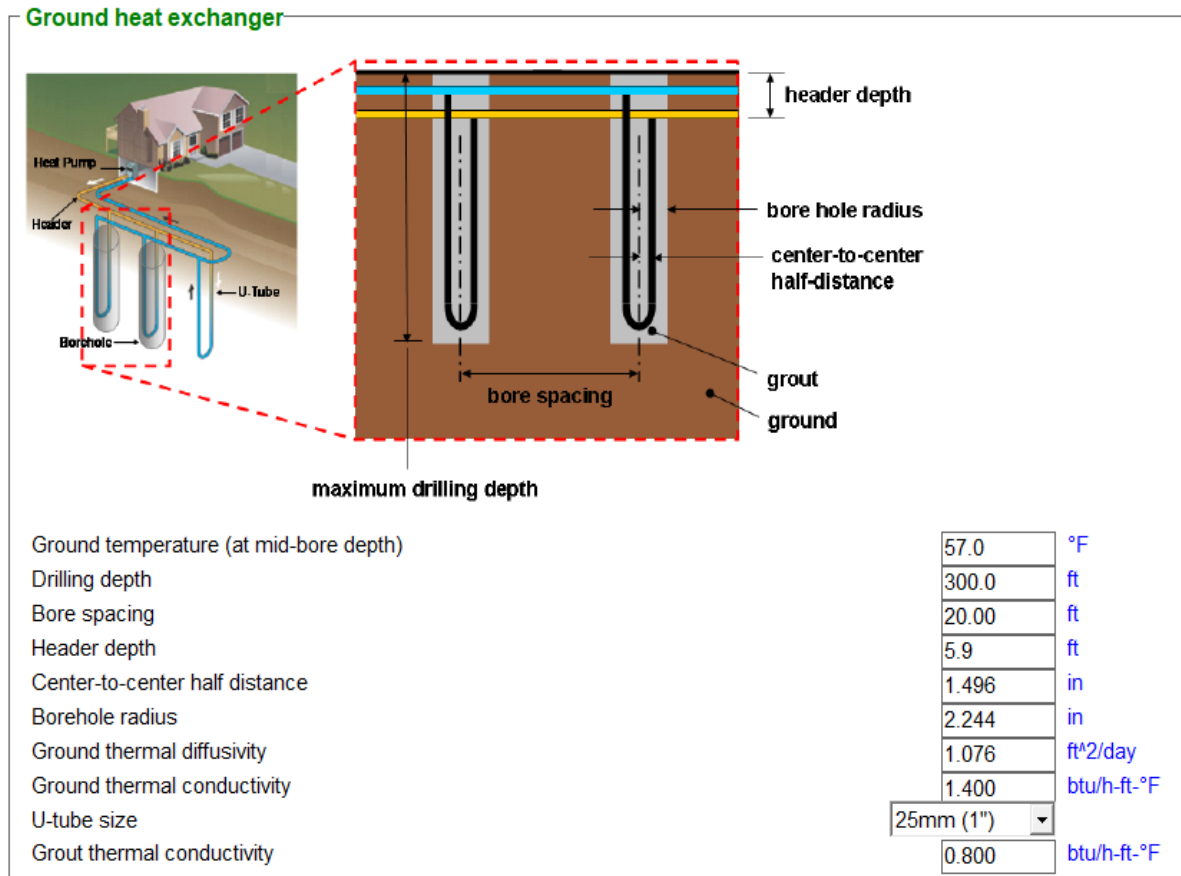


Рисунок 2.9 – Вікно програми NuGCHP, вхідні дані параметрів ґрунтового теплообмінника

В наступних вікнах задаються параметри теплоносія, методика підрахунку, економічні параметри.

Після цього запускається симуляція, під час якої підраховується температура теплоносія, і кількість теплоти, що передається або забирається з ґрунту.

Результатом є розрахунок вартості експлуатації системи, з урахуванням вартості обладнання, буріння, електроенергії, а також параметри теплоносія і середньорічна зміна температури в шарі ґрунту. Результати моделювання представлені на рисунку 2.10.

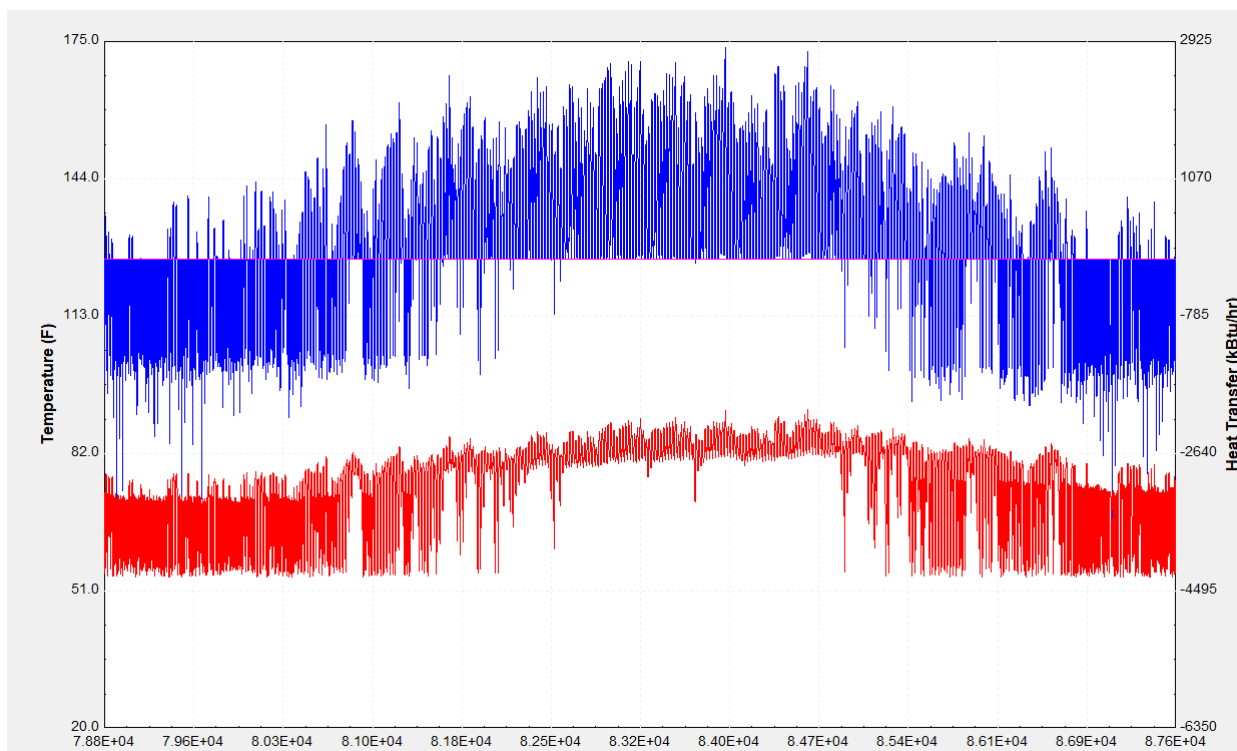


Рисунок 2.10 – Результати моделювання параметрів теплоносія і переносу теплоти протягом року

Програмне забезпечення дозволяє перевірити, наскільки вірно розрахований ґрунтовий теплообмінник, скважини для ґрунтових теплових насосів. Але в програмі немає опцій, що дозволяють задати конкретні параметри об'єкту, такі як помісячне споживання теплової енергії, ГВП, розрахунок оптимізаційних сценаріїв.

Було розглянуто і перевірено роботу найбільш популярного програмного забезпечення, серед варіантів, що доступні безкоштовно або мають повноцінну демо-версію.

Також існує інше спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання роботи теплових насосів:

- TRNSYS (Transient System Simulation Tool): Це інструмент для моделювання теплових систем, включно з тепловими насосами. TRNSYS пропонує гнучкість у моделюванні різних систем і компонентів, даючи змогу користувачеві створювати складні моделі енергосистем.

- EnergyPlus: Це програмне забезпечення, розроблене Міністерством енергетики США, призначене для моделювання будівель і їхніх систем опалення, вентиляції та кондиціонування, включно з тепловими насосами. Воно дає змогу проводити детальний аналіз енергоспоживання і теплового комфорту.

- HAP (Hourly Analysis Program) від Carrier: Це ще один популярний інструмент, який використовують для проєктування HVAC-систем, включно з тепловими насосами. HAP фокусується на розрахунках навантаження і споживання енергії для будівель різного призначення.

- EES (Engineering Equation Solver): Хоча EES не є спеціалізованим інструментом для моделювання теплових насосів, його гнучкість і здатність розв'язувати складні термодинамічні та теплотехнічні рівняння роблять його корисним для аналізу роботи теплових насосів.

- Ground Loop Design (GLD): Ця програма спеціалізується на проєктуванні геотермальних систем, включно з тепловими насосами. Вона допомагає в розрахунку та оптимізації геотермальних контурів і систем.

По результатам аналізу не було виявлено програмного забезпечення, що мало достатню гнучкість для розв'язання задачі підбору потужності теплового насосу і теплоакumuлюючого баку для теплопостачання багатоквартирних житлових будинків, які б давали можливість:

- 1) Комбінувати тепловий насос з ІТП.
- 2) Використовувати тепловий насос для попереднього підігріву води для потреб ГВП.
- 3) Гнучко керувати температурним режимом.
- 4) Враховувати динамічний водорозбір на протязі доби.
- 5) Задавати таблицю COP теплового насосу, в якості вхідного параметру, для обчислення COP в кожній точці.
- 6) Точного моделювання підігріву зворотки системи опалення і теплоакumuлюючого баку з взаємною залежністю температур.

Підсумовуючи, отримаємо, що існуюче програмне забезпечення:

а) переважно розроблялось в першу чергу для розрахунку теплових насосів для приватного будинку.

б) має ряд обмежень по температурам і комбінаціям з резервним джерелом.

в) не дає можливості моделювати різні сценарії, що можуть виникати при інтеграції теплових насосів в централізовані системи теплопостачання.

г) не враховують динаміку водорозбору на протязі доби.

Все сказане вище стало причиною необхідності розробки власної математичної моделі в MS EXCEL.

Наступний розділ присвячений опису розробленої математичної моделі.

## **2.2 Опис математичної моделі**

### **2.2.1 Загальна частина**

Математична модель побудована в середовищі Microsoft Excel.

Завданням моделі є:

- розрахунок оптимальної з економічної і технічної точки зору потужності теплового насоса та об'єму теплоакумулювальних баків;
- оцінювання параметрів роботи теплового насоса;
- можливість урахування додаткових заходів, такі як термомодернізація огорожень та модернізація інженерних мереж будівлі.

Модель дозволяє:

- розрахувати окупність проекту впровадження теплового насоса з обраними параметрами;
- розрахувати оптимальне співвідношення між потужністю теплового насоса та об'ємом теплоакумулювального бака для даного об'єкта;
- урахування змін інвестиційної складової залежно від проекту модернізації;
- моделювання роботи теплового насоса з урахуванням динамічно змінюваного COP внаслідок зміни погодних умов, температури води в теплоакумулюючому баку, водорозбору, температурного графіка системи опалення.

## 2.2.2 Вхідні параметри математичної моделі

### Вхідні дані:

#### 1.1. Економічні:

- 1) Тариф на електроенергію:  $T_e$  (грн/кВт\*год)
- 2) Тариф на теплову енергію:  $T_h$  (грн/Гкал)
- 3) Курс \$: грн/USD
- 4) Вартість теплового насосу, або питома вартість 1 кВт теплової потужності ТН з урахуванням проектних і монтажних робіт:  $C_{HP}$  (грн/кВт)
- 5) Вартість теплоакumuлюючого баку:  $C_{tank}$  (грн/1000л)
- 6) Вартість заміни радіаторів і встановлення термостатичного регулювання:  $C_{radiator}$  (грн)
- 7) Вартість комплексної термомодернізації будівлі:  $C_{mod}$  (грн)

#### 1.2. Технічні параметри теплового насосу:

- 1) Залежність  $COP=f(t_3)$
- 2) Тепловтрати баку, при температурі води  $55^{\circ}C$ :  $Q_{loss,tank}$ , кВт

#### 1.3. Технічні, будівля:

##### 1.3.1. Гаряча вода

- 1) Обсяги фактичного споживання гарячої води:

$V_{HW,daily,i}$  – середнє добове споживання в і-тому місяці року, л;

$V_{HW,monthly,i}$  – споживання за і-й місяць року, л

- 2) Дані по погодинному водорозбору на протязі доби:

$V_{HW,hour,i,j}$  – споживання в j-й годині доби, в і-й місяць року, л

- 3) Тепловтрати системи циркуляції ГВП в і-й місяць року:

$Q_{loss,HW,i}$ , кВт\*год

- 4) Кількість проживаючих:  $N_{residents}$ , людей

##### 1.3.2. Опалення

- 1) Обсяги споживання теплової енергії будинком, помісячно:

$Q_{heat,monthly}$ , Гкал

- 2) Фактичний температурний графік:  $T_{actual}(t)$
- 3) Температурний графік:  $T_{set}(t)$
- 4) Тип радіаторів опалення:  $Radiator_{type}$
- 5) Дані про огороджувальні конструкції будівлі:  $Wall_{data}$
- 6) (Альтернатива) Дані енергоаудиту з розрахунком енергопотреби / енергоспоживання:  $Q_{audit}$ , кВт\*год

#### **1.4. Кліматичні дані:**

- 1) Температура зовнішнього повітря, помісячно
- 2) Склад ґрунтів (для геотермальних ТН)
- 3) Температури на глибинах від 1 до 50 метрів, і середньостатистична їх річна динаміка (для геотермальних ТН)

### **2.2.3 Опис алгоритмів розрахунків для математичної моделі**

Першим етапом у виділені комірки вносяться базові вхідні дані про об'єкт відповідно до п.2.2.2. За відсутності певних даних, заносяться розрахункові показники, або фактичні дані.

Наступним кроком вносяться базові параметри обладнання. В ході математичного моделювання ці параметри будуть змінюватися, для прослідковування, їх впливу на економічні параметри проєкту, і на долю теплової енергії, що буде забезпечувати тепловий насос. На початковому етапі, для відправної точки, приймаються наступні параметри:

- Об'єм теплоакumuлюючого баку приймаємо виходячи із 40-50 % добового споживання гарячої води в січні.

- Теплову потужність ТН приймаємо з огляду на бажану долю забезпечення енергопотреби, для першої ітерації рекомендовано – 20 % від необхідної розрахункової потужності на опалення.

- Електрична потужність ТН задається з паспортних даних обраного обладнання, або, у випадку спрощеного розрахунку, як 28,5 % від теплової потужності.

Перша фаза моделювання – підігрів води тепловим насосом в теплоакumuлюючому баку.

Моделювання – погодинне. Для коректного визначення температури води в першій годині доби, необхідно провести першу ітерацію моделювання, при якій за початкову температуру води в баку, приймається температура холодної води.

Варто зазначити, що  $t_{\text{хол}}$  – може брaтися як нормативна ( $5^{\circ}\text{C}$  – для опалювального сезону,  $15^{\circ}\text{C}$  – для неопалювального), так і з фактичних показників, при наявності АСЕМ.

Таблиця залежності COP теплового насосу від температури зовнішнього середовища і теплоносія, що підігривається – також заноситься до вхідних даних.

За замовчуванням пропонується використання таблиці COP (рисунок 2.11) з наукового дослідження, проведеного з застосуванням теплового насосу.

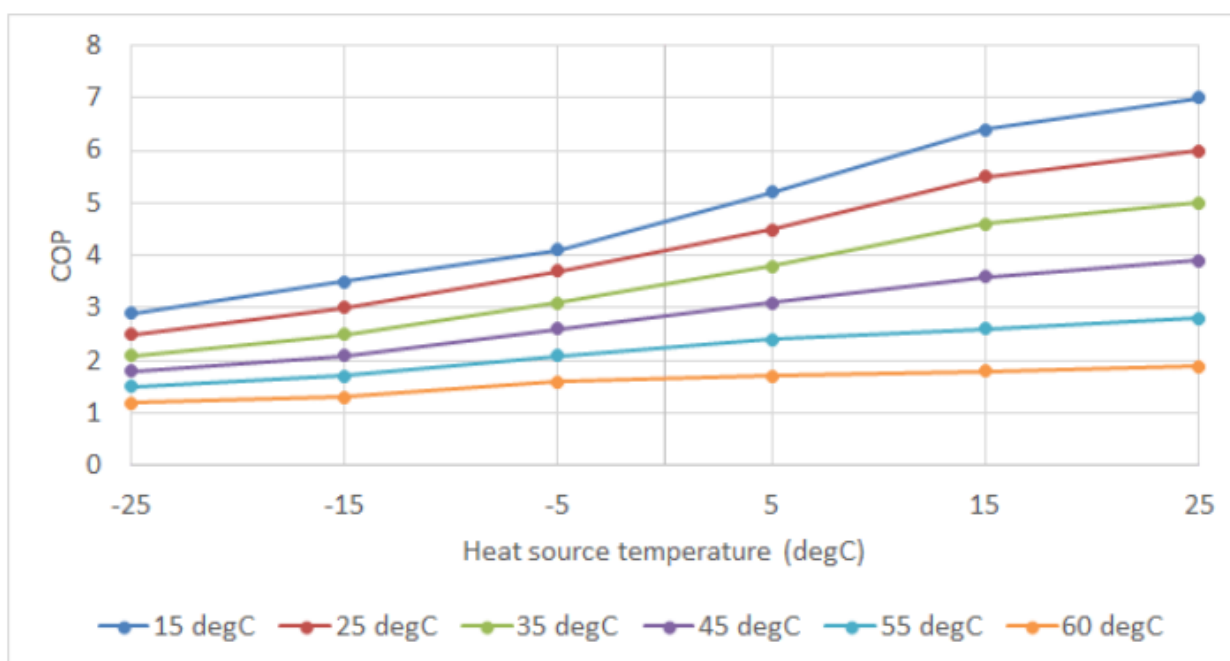


Рисунок 2.11 – Залежність COP теплового насоса «повітря-вода» в залежності від температур зовнішнього повітря і теплоносія, дослідження на основі моделі NIBE-2120 [29]

Визначається COP для роботи теплового насоса для кожної точки, що моделюється, інтерполяцією табличної функції.

Таблична інтерполяція:				
		-5	-4,7	0
	15	4,1	4,133	4,65
	15	4,1	<b>4,133</b>	4,65
	25	3,7	3,72	4,1
початкові дані	$y_{MID} = y_{LOW} + (y_{HIGH} - y_{LOW}) \times \left[ \frac{x_{MID} - x_{LOW}}{x_{HIGH} - x_{LOW}} \right]$			
шукане				

Рисунок 2.12 – Демонстрація роботи розробленої функції інтерполяції в MS EXCEL

Отримуємо COP при заданих температурах зовнішнього повітря і теплоносія.

Варто зазначити, що в таблицях COP для теплових насосів, виробники, як правило, вказують мінімальну температуру теплоносія – 15 градусів. З урахуванням того фактору, що ціллю всієї роботи є визначення економічної доцільності проєктів, і того, що незначна похибка в сторону меншого COP вплине на розрахований показник окупності проєкту в сторону збільшення строку окупності – тут, і в наступних схожих випадках, приймаємо, що COP при  $t_{\text{води}} < 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  дорівнює COP при  $t_{\text{води}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Кількість тепла, що буде вироблена тепловим насосом, буде дорівнювати:

$$Q_{\text{вир.і}} = Q_{\text{ном.}} / \text{COP}_{2/35\text{w}} * \text{COP}_i, \text{ кВт}, \quad (2.1)$$

де:

$Q_{\text{ном}}$  – номінальна теплова потужність теплового насосу при COP, що відповідає температурі зовнішнього повітря –  $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , і температурі теплоносія –  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , кВт;

$\text{COP}_{2/35\text{w}}$  – COP роботи теплового насосу при температурі зовнішнього повітря –  $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , і температурі теплоносія –  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Також розраховується теплообмін між теплоакumuлюючим баком і зовнішнім середовищем (повітрям підвалу).

Температура повітря в підвалі за замовчуванням приймається:

$$t_{\text{підв}} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Відповідно, в кожну  $i$ -ту годину тепловтрати будуть становити:

$$Q_{\text{тепловтрат.}i} = Q_{\text{бак}} \cdot (t_i - t_{\text{підв}}) = 0,027 \cdot (5 - 18) = -0,351 \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad (2.2)$$

де:

$Q_{\text{бак}}$  – характеристика тепловтрат теплоакumuлюючого баку, на  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  різниці температур в баку і зовнішньому середовищі, кВт;

$t_i$  – температура в теплоакumuлюючому баку в  $i$ -ту годину;

$t_{\text{підв}}$  – температура підвалу.

Наступним кроком буде визначення температури води на початок наступної години:

Цей розрахунок проводиться в 2 етапи.

На першому етапі, температура води в баку, визначається, як:

$$t_{i+1} = t_i + (Q_{\text{вир.}i} - Q_{\text{те.втрат.}i} \cdot (t_i - t_{\text{підв}}) - V_{\text{вир.}i} \cdot (t_i - t_{\text{хол}}) / 3600 \cdot 4,18) / 3600 / V_{\text{бак}} / 4,18, \quad (2.3)$$

де:

$V_{\text{бак}}$  – об'єм теплоакumuлюючого баку, л;

$V_{\text{вир.}i}$  – водорозбір гарячої води в  $i$ -ту годину, л;

Інші складові формули – визначені в попередніх формулах.

Ця формула враховує кількість теплової енергії, що була отримана баком завдяки роботі теплового насосу, кількість тепла, що була витрачена на підігрів холодної води, що надходить за рахунок водорозбору в бак, і тепловтрати баку.

Наступним кроком є розрахунок COP і базової теплової потужності ТН для наступної години, аналогічно розрахунку для попередньої години.

Для коректного розрахунку всього процесу, необхідно корегувати COP, з урахуванням водорозбору, при якому холодна вода, температура якої - нижче, за температуру води в баку, потрапляє в відокремлену нижню частину баку (або спеціальний бак, в залежності від схеми проекту) і підігрівається від своєї температури, до температури в баку. COP даного підігріву буде, в переважній більшості ситуацій, більш високим, ніж COP підігріву основної ємності води в баку. Для моделювання, ці процеси розділяються.

Відповідно,  $COP_{1,i}$  –  $COP$  підігріву основної маси води в баку, розраховується, для температури що встановилась в баку на початок години.  $COP_{2,i}$  – для нагріву холодної води, що надходить в бак, розраховуються, відповідно до  $t_{\text{води}2,i} = (t_{\text{хол}} + t_i)/2$ , °C.

$$(2.4)$$

Наступним кроком, розраховується кількість теплової енергії, необхідної для догріву холодної води, що надходить в бак, то температури води в баку:

$$Q_{\text{догр.}i} = V_{\text{вигр.}i} * (t_i - t_{\text{хол}}) / 3600 * 4,18 \text{ кВт} \quad (2.5)$$

Розрахунок долі теплової енергії, що була використана на догрів холодної води по відношенню до теплової потужності теплового насосу при заданому  $COP$ . Це дозволяє, також, перевірити, чи достатньо потужності теплового насосу для догріву всієї води, що надійшла в теплоакumuлюючий бак до температури в баку:

$$n_{\text{догр.}i} = Q_{\text{догр.}i} / (Q_{\text{тн}} / COP_{\text{ном.}} * COP_{2i}) \quad (2.6)$$

З урахуванням цього, кількість теплової енергії, що залишається на підігрів всього об'єму води в баку:

$$Q_{\text{нагр.}} = Q_i * (1 - n_{\text{догр.}i}), \text{ кВт} \quad (2.7)$$

Тут також проводиться перевірка, на результуючу температуру в теплоакumuлюючому баку, і якщо в результаті вона перевищить задану (55 °C), кількість теплової енергії корегується.

Відповідно, доля теплової енергії, що виробляється тепловим насосом, і використовується для нагріву теплоакumuлюючого баку, за винятком догріву поступаючої холодної води:

$$n_{\text{нагріву}} = 96,6 \%$$

Загальна кількість теплової енергії, що надійде до теплоакumuлюючого баку в дану годину:

$$Q_i = Q_{\text{нагр.}} + Q_{\text{догр.}}, \text{ кВт} \quad (2.8)$$

Результуючий  $COP$ :

$$COP_{\text{рез.}} = (COP_1 * n_{\text{нагр.}} + COP_2 * n_{\text{догр.}}) / (n_{\text{нагр.}} + n_{\text{догр.}}) \quad (2.9)$$

Відсоток завантаження теплового насосу та споживання електроенергії – розраховуємо аналогічно.

Всі наступні ітерації розрахунків, для кожної години – розраховуються аналогічно.

Результатом даного етапу розрахунків є моделювання погодинного нагрів теплоакumuлюючого баку тепловим насосом, на протязі доби, при заданій початковій температурі води в баку – 5 °С.

На наступному етапі ми проводимо аналогічне моделювання, всі формули, змінні і вхідні дані - аналогічні, але, початковою температурою води в баку на 00:00 годину буде кінцева температура води в баку з урахуванням попереднього розрахунку – 51,78 °С.

Ця ітерація дозволяє провести моделювання вже в наближених до реальності умовах стабільної роботи теплового насосу на підігрів теплоакumuлюючого баку.

Виконавши розрахунки, аналогічні попереднім, але вже з нагрітим баком, отримуємо погодинні значення температур в теплоакumuлюючому баку, COP роботи теплового насосу, кількість теплової енергії, що передається теплоакumuлюючому баку, водорозбір та витрати електричної енергії. Приклад такої таблиці представлений в розділі 3.2.

Наступним кроком є проведення аналогічного моделювання для кожного місяця року.

Кожного місяця змінюються наступні вхідні параметри:

1. Температура зовнішнього повітря (впливає на COP теплового насосу).
2. Усереднений добовий водорозбір (дані свідчать про зменшення споживання гарячої води в неопалювальний сезон).
3. Температура холодної води.

Результатом помісячного моделювання роботи ТН є результати виробництву теплової енергії, і споживанню електричної енергії тепловим насосом за кожен місяць року, що дозволяє отримати ці показники за рік.

Фінальним етапом розрахунків є визначення економічних параметрів проекту з заданими параметрами, зокрема – тарифами на енергоносії, вартістю ТН, або 1 кВт встановленої потужності ТН, з урахуванням всіх супутніх витрат.

COP роботи теплового насосу буде мінімальним взимку – 3,31 в січні, і максимальним влітку – в липні.

Із результатів розрахунків можна зробити проміжні висновки щодо достатності встановленої потужності теплового насосу для забезпечення будівлі в тепловій енергії на потреби ГВП, достатності заданих об'ємів теплоакumuлюючих баків та окупності проєкту і, за необхідності скорегувати вхідні параметри. Виконання математичної моделі в MS EXCEL дозволяє скорегувати будь-який параметр незалежно від інших, і отримати новий результат розрахунків за кілька секунд. Блок-схема моделі наведена в додатку 1.

#### **2.2.4 Моделювання роботи теплового насосу в якості джерела теплової енергії на потреби ГВП та опалення будівлі**

В попередньому підрозділі було розглянуто моделювання роботи теплового насосу на підігрів теплоакumuлюючого баку, для потреб ГВП.

З урахуванням ряду факторів, таких як відносно низька температура теплоносія в зворотному трубопроводі системи опалення на протязі більшої частини опалювального сезону, особливо для гарно утеплених будинків з налаштованим ІТП, порівняно з нормативною температурою гарячої води, доцільно застосовувати ТН на підігрів теплоносія в системі опалення, і для попереднього підігріву гарячої води, з автоматичною регуляцією теплообмінників, що розташовані в теплоакumuлюючих баках і зворотному трубопроводі системи опалення таким чином, щоб температура підігріву води в баку була обмежена температурою підігріву системи опалення тепловим насосом. Така автоматизація дозволить максимізувати COP роботи теплового насосу в кожен момент часу.

Розрахунок роботи теплового насосу на потреби опалення і ГВП проводиться на основі модифікованого розрахунку роботи ТН на потреби ГВП.

Для кожного місяця визначається, на основі вхідних даних:

- Температура теплоносія в трубопроводі подачі опалення
- Температура теплоносія в зворотному трубопроводі системи опалення

- Середня потужність, необхідна для забезпечення енергопотреб на опалення, що дорівнює:

$$P_{\text{оп}} = Q_{\text{оп}}/T_{\text{міс}} * 1163, \text{ кВт}, \quad (2.10)$$

де:

$Q_{\text{оп}}$  – кількість теплової енергії, що споживається будинком за місяць на потреби опалення;

$T$  – кількість годин в місяці.

Наступним кроком визначається COP підігріву системи опалення тепловим насосом кожної години. Для цього необхідно визначити середню температуру підігріву зворотки системи опалення, що розраховується в декілька ітерацій:

1) На першому кроці приймається, що температура ЗТСО (зворотній трубопровод системи опалення) в даній годині вище температури, до якої тепловий насос догрів ЗТСО на  $1^{\circ}\text{C}$ . (Але не вище  $55$  градусів).

$$t_{\text{оп.і}} = t_{\text{догр}24\text{ф.}}$$

2) Розраховується COP роботи теплового насосу при підігріві ЗТСО до даної температури.

3) Розраховується кількість теплової енергії, що буде здатний виробити тепловий насос при даному COP, з припущенням що  $25\%$  потужності теплового насосу буде задіяно на підігрів теплоакumuлюючого баку, і  $75\%$  - на підігрів СО.

$$Q_{\text{теор.0.і}} = Q_{\text{тн.і}}/\text{COP}_{\text{ном.}} * \text{COP}_{\text{теор.оп.1}} * 0,75, \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (2.11)$$

4) Розраховується теоретична температура догріву ЗТСО, з урахуванням вище розрахованої кількості теплової енергії, що буде передана тепловим насосом системі опалення:

$$t_{\text{теор.}} = t_{\text{зв.}} + (t_{\text{зв.}} + (t_{\text{зв.}}/P_{\text{оп}} * (t_{\text{под}} - t_{\text{зв.}})))^{\circ}\text{C} \quad (2.12)$$

5) Розраховується середня температура, між температурою догріву і початковою температурою ЗТСО:

$$t_{\text{теор.сер.}} = (t_{\text{теор.}} + t_{\text{зв.}})/2^{\circ}\text{C} \quad (2.13)$$

6) Розраховується COP роботи теплового насосу, відповідно уточнений для даної температури –  $\text{COP}_{\text{теор1.оп}}$

7) Проводиться моделювання підігріву теплоакumuлюючого баку, аналогічно розрахункам в попередньому розділі, але температура нагріву баку обмежена температурою підігріву ЗТСО + 1 градус.

Таким чином, температура в баку не може перевищувати температуру ЗТСО більше ніж на 1 °С.

8) Підраховується відсоток теплової енергії, що витрачається на підігрів теплоакumuлюючого баку тепловим насосом по відношенню до кількості теплової енергії, що ТН здатний виробити.

9) Теоретична кількість теплової енергії, що буде вироблена тепловим насосом на потреби СО в цю годину буде дорівнювати:

$$Q_{\text{теор}} = Q_{\text{ТН}} / \text{COP}_{\text{ном.}} \cdot \text{COP}_{\text{теор.оп.1}} * (1 - \eta_{\text{ГВП}}), \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.14)$$

10) Розраховується теоретична температура догріву ЗТСО,  $t_{\text{теор.2}}$  з урахуванням вище розрахованої кількості теплової енергії, що буде передана тепловим насосом системі опалення, аналогічно (4), але за основу вже береться кількість теплової енергії, розрахована в (9), тобто з урахуванням розподілу теплової енергії між підігрівом теплоакumuлюючого баку і системи опалення:

Проводяться розрахунки за формулами (5)-(9).

Отримується фактична температура догріву ЗТСО. –  $t_{\text{догр.факт.}}, \text{ } ^\circ\text{C}$

Подальшими кроками, аналогічно розрахункам з попереднього підрозділу, визначаються:

- результуючий COP роботи теплового насосу;
- відсоток завантаження теплового насосу, з розбиттям між підігрівом СО і теплоакumuлюючим баком;
- витрати електроенергії ТН;
- кількість виробленої теплової енергії ТН.

Аналіз даних показників дозволяє визначити, чи доцільно в проєкті використовувати тепловий насос і на потреби ГВП, і на потреби в опаленні будівлі.

Після проведених розрахунків, доцільно в декілька ітерацій провести моделювання з більшими потужностями ТН, аналізуючи, як змінюється строк

окупності і відсоток забезпечення енергопотреби в опаленні будівлі, від зміни вхідного параметру.

Розроблена математична модель дозволяє провести аналіз змін результуючих техніко-економічних параметрів проєкту, для визначення можливого впливу факторів ризику, а також оцінити наступні залежності, та побудувати по ним графіки, що візуалізують їх:

- залежність строку окупності і економії від потужності теплового насосу.
- залежність строку окупності від тарифу на теплову енергію та вартості природного газу.
- залежність строку окупності проєкту від тарифу на електричну енергію.
- залежність економії і строку окупності проєкту від температурного графіку системи опалення.

Аналіз цих залежностей дозволяє як підібрати оптимальну, з урахуванням бажаних економічних показників проєкту, потужність теплового насосу, так і оцінити ризики щодо зміни вартості енергоносіїв, а також провести оцінку доцільності модернізації системи опалення будівлі з ціллю зниження температурного графіку.

### **2.3 Аналіз норм споживання гарячої води для різних часових інтервалів та вибір вхідних даних для розрахунків**

Розглянемо нормативні документи, де наведено норми споживання теплоенергії енергії або гарячої води на потреби ГВП.

В [30] для потреб енергетичної сертифікації за відсутності точних даних під час розрахунку енергопотреби на гаряче водопостачання рекомендовано обирати значення нормативів в кВт·год на 1 м<sup>2</sup> кондиціонованої площі (рисунок 2.13).

Призначення будівлі	кВт·год/м <sup>2</sup>
Одноквартирні будинки	15
Багатоквартирні житлові будівлі, гуртожитки	20
Громадські будівлі адміністративного призначення, офіси	10
Будівлі закладів освіти	10
Будівлі закладів дошкільної освіти	15
Будівлі закладів охорони здоров'я	30
Готелі* (на 10 % більше для кожної зірочки)	25
Ресторани	60
Спортивні заклади	80
Будівлі закладів гуртової та роздрібної торгівлі	10
Будівлі культурно-розважальних закладів та дозвільних установ	10
Інші види будівель, товарні склади	1,5

Рисунок 2.13 – Питомі річні енергопотреби на ГВП для потреб енергосертифікації за ДСТУ 9190 [30]

Зазначимо, що з роками змінювалися підходи до визначення показників енергоефективності будівель, зокрема: з 2006 включалися лише потреби на опалення; після 2013 року – енергопотреба [31] на опалення, охолодження та гаряче водопостачання (ГВП); із введенням енергетичної сертифікації з 2018 року при обчисленні класу енергоефективності будівель – енергоспоживання на опалення, охолодження та ГВП [32], а з жовтня 2020 року до уваги береться лише енергоспоживання на опалення та охолодження [33]. Із введенням нових мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель [33] наприкінці 2020 року внесено і зміни до методики сертифікації будівель [33], зокрема в частині енергопотреби на ГВП: замість нормативних добових витрат на одного мешканця (л/добу) до розрахунку беруться питомі витрати енергії на одиницю опалювальної площі (кВт·год/м<sup>2</sup>) [34].

За методикою [32], що діяла до 2020 року, енергопотреба для ГВП розраховувалася за формулою:

$$Q_{DHW,nd} = c_w V_w (\theta_{w,del} - \theta_{w,0}) \alpha_x, \quad (2.15)$$

де:

$c_w$  – теплоємність води, кДж/(кг·К);

$V_w$  – річний обсяг споживання води, кг, що розраховується за формулою (2);

$\Theta_{w,del}$  – встановлена температура подачі гарячої води, °С;

$\Theta_{w,0}$  – середня річна температура холодної води,

яку приймають рівною 10 °С;

$\alpha_x$  – коефіцієнт переведення (кДж в кВт·год),

що приймають  $0,278 \cdot 10^{-3}$  кВт·год/кДж.

Річний обсяг споживання води, кг, розраховувався за формулою:

$$V_w = q_w n_m n_d \rho_w 10^{-3}, \quad (2.16)$$

де:

$q_w$  – середня за рік добова витрата води, л/добу, яка визначається згідно таблиць А.1 та А.2 ДБН В.2.5-64:2012 [35], або розрахунковим шляхом, враховуючи фактичний обсяг споживання гарячої води відповідно до показників вузла комерційного обліку;

$n_m$  – кількість розрахунквих одиниць споживання гарячої води, вид яких визначається згідно таблиць А.1 та А.2 [36], а кількість – згідно з фактичними значеннями;

$n_d$  – кількість діб роботи системи ГВП;

$\rho_w$  – густина води за нормальних умов, кг/м<sup>3</sup>.

За новою методикою [37], що почала діяти з кінця 2020 року, для цілей сертифікації енергоефективності енергопотреба для ГВП  $Q_{DHW,nd}$  [кВт·год] потрібно визначати за питомими показниками на 1 м<sup>2</sup> залежно від типу будівель за табл.34 [38], для багатоквартирних житлових будівель це значення становить 20 кВт·год/м<sup>2</sup>.

Згідно ДБН В.2.5-64:2012 [35], додаток А, розрахункові витрати води, Таблиця А.1, для першого кліматичного району, наведено розрахункові добові витрати води в житлових будинках.

В переважній більшості квартир в будинках з централізованим гарячим водопостачанням, наявні ванни завдовжки більше ніж 1500 мм, отже, виходячи з

таблиці А.1, необхідно використовувати норматив в 100 л гарячої води на добу, тобто 3 м<sup>3</sup> за місяць на людину.

Також вказується "соціальна норма" в 1,6 м<sup>3</sup> гарячої води на особу в місяць [39], яка застосовується для пільгових категорій під час розрахунку субсидії.

Існують норми, які використовують теплоенерго і водоканали, нараховуючи по 3 м<sup>3</sup> гарячої води на місяць для людей, які не мають засобів обліку водоспоживання [40].

Незважаючи на велику кількість різних нормативів споживання гарячої води за різних параметрів, достатньо ємного та повноцінного обґрунтування цих норм, яке б ґрунтувалося на реальній статистиці споживання гарячої води мешканцями багатоквартирних будинків, яка була б актуальною в останні роки – не опубліковано.

З урахуванням того факту, що розрахунок теплового насоса під завищені енергопотребити приведе до значного збільшення капітальних витрат і строків окупності проекту, необхідно враховувати реальну ситуацію.

Зокрема, окремим питанням є уточнення фактичної кількості мешканців в будівлі, що використовують гаряче водопостачання. Проблема статистики споживання гарячої води значно поглиблюється тим фактом, що в багатьох квартирах мешканці встановили собі електробойлери і використовують їх або замість централізованого гарячого водопостачання, або в періоди відключень. Це призводить до необхідності уточнення узагальненої статистики споживання гарячої води.

Теоретично, можливе виведення певної пропорції, скільки % гарячої води люди використовують з-поміж загального водопостачання, і, таким чином, маючи дані по споживанню холодної води, і споживанню централізованої гарячої води на рівні будинку, можливо було б вивести певні значення питомого споживання.

Можливі наступні варіанти для визначення фактичного споживання на потреби ГВП:

1) За наявності даних від енергопостачальних організацій по погодинному водопостачанню до сусідніх будівель можна припустити, що графік водорозбору буде близьким до значень будівель районі розташування будівлі;

2) При наявності даних від автоматизованих систем моніторингу для максимально можливої кількості будинків певного типу можна вивести усереднений графік використання гарячої води протягом доби.

Також потрібно уточнити кількість квартир зі встановленими бойлерами і визначити режим їх використання мешканцями (постійно, тільки під час відключень гарячої води, інший).

Одним з найбільш достовірних і точних джерел інформації про актуальне споживання гарячої води можна вважати дані з АСЕМ (Автоматизованої Системи Енергетичного Моніторингу), обладнання та датчики якої встановлені в певних житлових будинках. Перевага даних, узятих з цієї системи в тому, що можливо побачити не лише щомісячне, а й щогодинне споживання як обсягів води, холодної та гарячої, так і теплової енергії, що споживається будинком.

Проаналізуємо витрати теплоенергії на потреби опалення та ГВП за фактичними даними, отриманими із системи автоматизованого моніторингу будинку ОСББ "Мотор" за адресою м.Київ, вул.Підвисоцького 3-А [41].

Дані з АСЕМ аналізувалися в погодинних часових інтервалах. У підсумку, опрацювання бази даних щодо споживання гарячої води та теплової енергії будинком, дало змогу отримати такі вхідні дані:

1. Помісячне споживання гарячої води і теплової енергії (дані використані в подальшому під час розрахунків енергобалансів);

2. Погодинне споживання гарячої та холодної води, що дає змогу побудувати добовий графік споживання води і визначити піки водоспоживання, а також періоди, коли воно практично відсутнє. Це необхідно для розрахунку параметрів теплоакumuлюючого бака та моделювання його нагрівання тепловим насосом з урахуванням водорозбору.

3. Добове споживання гарячої води за кожен місяць спостереження, що дає змогу визначити середньостатистичне споживання і підібрати потужність теплоакмулювального бака і теплового насоса оптимально (рисунок 2.14).

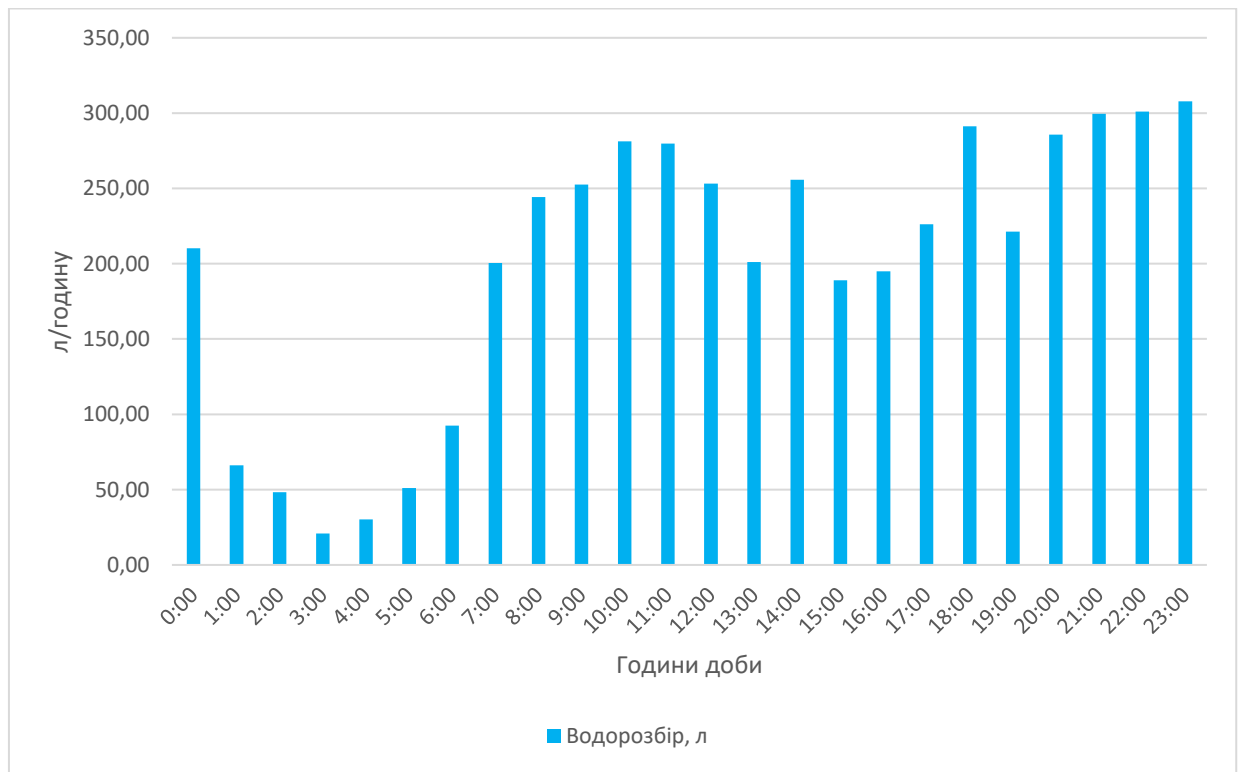


Рисунок 2.14 – Усереднене погодинне споживання гарячої води протягом доби на об'єкті дослідження

## Висновки до розділу 2

1) Проаналізовано існуючі підходи до моделювання роботи теплового насоса. По результатам аналізу визначена необхідність в розробці власної математичної моделі, що буде спеціалізованою під задачі дослідження.

2) Розроблена математична модель дозволяє моделювати роботу теплового насоса, що забезпечує тепловою енергією потреби багатоквартирного житлового будинку на ГВП і опалення, з урахуванням ряду параметрів, кожен з яких може змінюватися і суттєво впливати на економічні характеристики проєкту.

3) В ході моделювання було проаналізовано залежності економічних параметрів проєкту від ряду вхідних даних, таких як тарифи на енергоносії, потужність теплового насоса, температурний графік системи опалення будівлі.

Результати моделювання представлені у вигляді таблиць і графіків і дозволяють проаналізувати доцільність впровадження проєкту при різних сценаріях як динаміки ринку енергоносіїв, так і термомодернізації будівлі.

4) Розроблена математична модель має значну гнучкість в використанні: тепловий насос може бути використовуваний як на виробництво теплової енергії на енергопотребу тільки ГВП чи тільки опалення, так і на комбіновану енергопотребу. Можливе використання математичної моделі для теплових насосів різних типів, включно з геотермальними. Таблиця COP – є вхідними даними, що можуть редагуватися, в залежності від вибраного виробника і моделі обладнання.

5) Проаналізовано наявні підходи до визначення споживання гарячої води мешканцями багатоквартирних будівель, зафіксовано умовності і неточності в наявних підходах.

## РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ РОЗРОБЛЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

### 3.1 Постановка задачі і опис підходів, що застосовуються

На основі розробленої і описаної в розділі 2.2 математичної моделі було проведено оцінку оптимальних сценаріїв використання теплових насосів – це є важливим кроком для визначення найбільш ефективних в коротко- і середньостроковій перспективі сфер застосування теплових насосів.

Для проведення такого аналізу, було обрано ряд об'єктів різного типу і параметрів, щоб проаналізувати, в яких сценаріях теплові насоси можуть показати кращі перспективи застосування.

Для кожного об'єкту був проведений помісячний розрахунок кількості теплової енергії, що може бути вироблена тепловими насосами різної потужності, з урахуванням зміни COP теплового насосу в залежності від зміни температури навколишнього середовища (зовнішнього повітря – для теплових насосів типу повітря-вода, і ґрунту – для геотермальних теплових насосів). Обмежуючими факторами виступали:

- енергопотреба будівель;
- економічна доцільність проєктів;
- діапазони температур, підігріву теплоносія, що доцільні для використання теплових насосів;
- коефіцієнт використання встановленої потужності ТН.

В розрахунках використовуються ринкові тарифи на електроенергію і природний газ. Дані тарифи близькі до середньоєвропейських, і прогнозується перспектива, що з часом, тарифи, в тому числі і для населення, будуть наближатися до тарифів на енергоносії в ЄС.

Для різних міст тарифи на природний газ і електроенергію відрізняються, що пов'язано з різною вартістю послуг з розподілу електроенергії і доставки газу по областям. Аналогічно, в різних містах відрізняється доля вартості газу в

виробництві теплової енергії, відповідно, відрізняється і її, розрахована відповідно до ринкової вартості газу, вартість.

### **3.2 5-поверхова житлова будівля в м. Київ**

#### **3.2.1 Опис вхідних даних-**

Житловий будинок – 5-поверховий, побудований в 1965 р., типовий зразок радянської забудови (типовий проект 1-480-19А, рис. 3.1). Таких будівель та будівель зі схожими характеристиками огорожувальних конструкцій – тисячі в Україні, вони найбільш потребують термомодернізації.

Цей же будинок – утеплений, встановлено ІТП, налаштування ІТП оптимальні, температурний графік – оптимізовано. В минулі роки, в будинку по декілька місяців не було доступне централізоване ГВП, що робить питання надійного постачання ГВП – максимально актуальним.



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд фасаду будівлі

Даний об'єкт було обрано через наявність автоматизованої системи енергетичного моніторингу з датчиками в ІТП, що надає можливість побудувати фактичний графік водорозбору гарячої води.

Дані автоматизованої системи енергетичного моніторингу представлено на рис. 3.2, 3.3 та у табл.3.1.

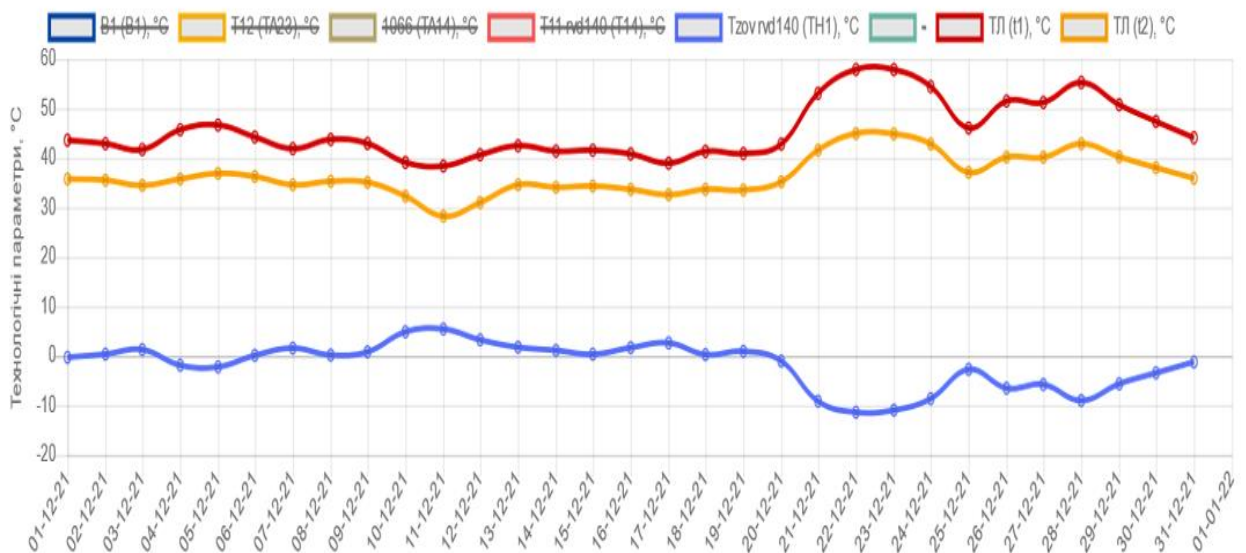


Рисунок 3.2 – Графік зміни температур в системі опалення при зміні температури зовнішнього повітря в АСЕМ

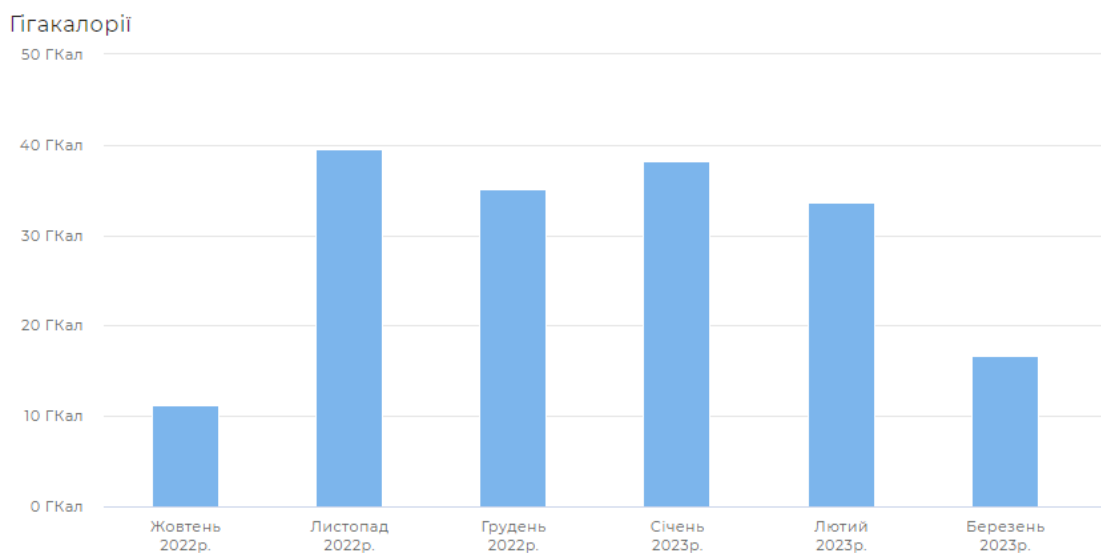


Рисунок 3.3 – Споживання теплової енергії будівлею по місяцям [42]

Таблиця 3.1 – Споживання теплової енергії будівлею та фактичний температурний графік системи опалення

	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Середньомісячна температура зовнішнього повітря $^{\circ}\text{C}$	-4,7	-3,6	1	9	15,2	18,3	19,8	19	13,9	8,1	1,9	-2,5
Помісячне споживання гарячої води, $\text{м}^3$	148,94	146,69	142,17	133,34	120,39	82,82	88,12	89,93	97,56	127,72	110,88	122
Усереднене добове споживання гарячої води, л	4805	5239	4586	4445	3884	2761	2843	2901	3252	4120	3696	3936
Споживання Гкал на ГВП, з урахуванням циркуляції, Гкал	10,19	10,07	9,85	8,74	7,56	6,05	6,26	6,34	6,64	8,49	8,28	8,84
Споживання тепла на опалення, Гкал	30,31	27,38	10,45								29,12	28,16
Споживання тепла за місяць, кВт·год	35251	31843	12153								33867	32750
Т подачі, $^{\circ}\text{C}$	40,5	39,9	34,7								39,2	40,1
Т зворотки, $^{\circ}\text{C}$	33,3	33,9	30,9								33,0	33,0

Передбачається встановлення теплового насосу типу "повітря-вода" і теплоакумулюючих баків з теплообмінниками і сепараторами. Дана система інтегрується з ІТП в підвалі будинку. Теплоакумулюючий бак підключається до трубопроводу подачі холодної води на ГВП, і, таким чином, тепловий насос працює на попередній підігрів води для ГВП.

Тепловий насос налаштовується на підігрів води в баку на 55 градусів. З урахуванням змінної температури зовнішнього повітря, режимів водорозбору і інших факторів, температура води на виході з баку в певні періоди буде менше 55 градусів, і її догрів буде відбуватися на теплообміннику ГВП в ІТП.

Об'єм теплоакumuлюючого баку приймаємо виходячи із 40-50 % добового споживання гарячої води в січні. В даному випадку, січневе середнє споживання гарячої води за добу - 4804,52 л, відповідно, об'єм баку:

$$V = 2000 \text{ л.}$$

Теплова потужність ТН при 2/35W (COP = 3,5):

$$Q = 16 \text{ кВт.}$$

Електрична потужність ТН - 4,57 кВт.

Перша фаза моделювання - підігрів води тепловим насосом в теплоакumuлюючому баку.

Для даного об'єкта використовуються нормативні показники температур холодної води. Оскільки перший місяць моделювання - січень,  $t_{\text{хол}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Внесемо до вхідних даних таблицю COP з наукового дослідження, проведеного з застосуванням теплового насосу:

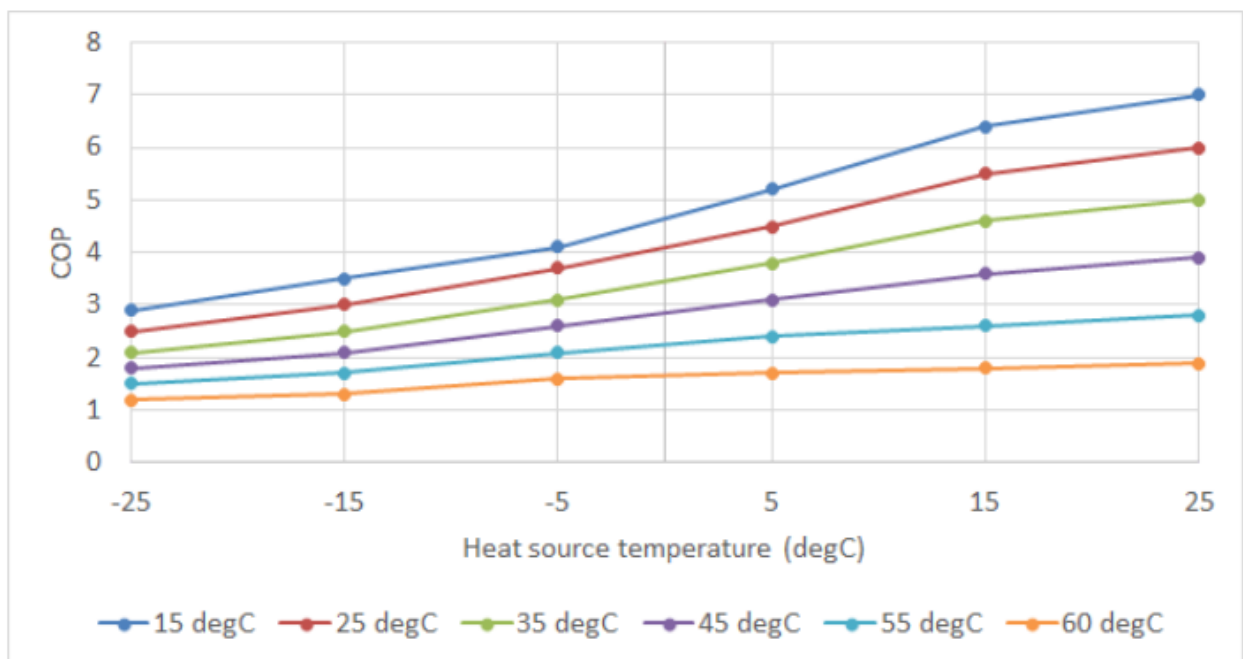


Рисунок 3.4 – Залежність COP теплового насосу «повітря-вода» в залежності від температур зовнішнього повітря і теплоносія, дослідження на основі моделі NIBE-2120 [29]

### 3.2.2 Опис методики розрахунків, на прикладі об'єкту дослідження

Першим кроком визначається COP для роботи теплового насосу для моменту запуску теплового насосу:

Таблична інтерполяція:				
		-5	-4,7	0
	15	4,1	4,133	4,65
	15	4,1	<b>4,133</b>	4,65
	25	3,7	3,72	4,1
початкові дані	$y_{\text{MID}} = y_{\text{LOW}} + (y_{\text{HIGH}} - y_{\text{LOW}}) \times \left[ \frac{x_{\text{MID}} - x_{\text{LOW}}}{x_{\text{HIGH}} - x_{\text{LOW}}} \right]$			
шукане				

Рисунок 3.5 – Демонстрація роботи розробленої функції апроксимації в MS EXCEL

Інтерполяцією табличної функції методом найменших квадратів отримуємо COP при температурі зовнішнього повітря -4,7 градусів, і температурі води - 5 градусів, - 4,133.

Всі подальші розрахунки проводяться згідно з формулами з розділу 2.2. Всі наведені змінні – відповідають змінним, описаним в розділі 2.2.

Кількість теплової енергії, що буде вироблена тепловим насосом в першу годину, буде дорівнювати:

$$Q_{\text{вир.і}} = Q_{\text{ном.}} / \text{COP}_{2/35\text{w}} * \text{COP}_i = 16/3,5 * 4,133 = 18,894. \quad (3.1)$$

Вся теплота, що виробляється тепловим насосом, на цьому кроці, йде на підігрів води в теплоакumuлюючому баку.

Температура повітря в підвалі приймається:

$$t_{\text{підв}} = 18 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Характеристики теплоакumuлюючого бака: Тепловтрати на 1 °C різниці температури води і температури зовнішнього середовища:

$$Q_{\text{бак}} = 0,027 \text{ кВт.}$$

Відповідно, в дану годину тепловтрати будуть становити:

$$Q_{\text{тепловтрат.і}} = Q_{\text{бак}} * (t_{\text{бак.і}} - t_{\text{підв}}) = 0,027 * (5 - 18) = -0,351 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.2)$$

В даному випадку, тепловтрати від'ємні, оскільки для задачі першої ітерації моделювання ми приймаємо, що початкова температура води в баку - 5 градусів, що є практично неможливою ситуацією, при роботі системи, але ціллю даної ітерації моделювання є визначення реальної початкової температури в баку в кінці доби.

Наступним кроком є розрахунок температури води на початок наступної години:

1:00. Цей розрахунок проводиться в 2 етапи.

На першому етапі, температура води в баку, визначається, як:

$$\begin{aligned} t_{1:00} &= t_{0:00} + (Q_{0:00} - Q_{\text{тепловтрат}} * (t_{\text{бак}} - t_{\text{підв}}) - V_{\text{витрата}} \times \\ &\times (t_{0:00} - t_{\text{хол}}) / 3600 * 4,18) * 3600 / V_{\text{бак}} / 4,18 = \\ &= 5 + (18,894 - 0,027 * (5 - 5) - 210,21 \times (5 - 5) / 3600 * 4,18) \times \\ &\times 3600 / 2000 / 4,18 = 13,287 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Розраховуємо COP, базову теплову потужність для наступної години аналогічно розрахунку для попередньої години:

$$\text{COP}_2 = 4,133$$

Наступним кроком, розраховуємо кількість теплової енергії, необхідної для догріву холодної води, що надходить в бак до температури води в баку:

$$\begin{aligned} Q_{\text{догр.}} &= V_{\text{вitr.1:00}} * (t_{1:00} - t_{\text{хол}}) / 3600 * 4,18 = 66,24 \times \\ &\times (13,287 - 5) / 3600 * 4,18 = 0,637 \text{ кВт}\cdot\text{год} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Визначимо долю теплової енергії, що була використана на догрів холодної води по відношенню до теплової потужності теплового насоса при заданому COP.

Це дозволяє, також, перевірити, чи достатньо потужності теплового насосу для догріву всієї води, що надійшла в теплоакumuлюючий бак до температури в баку:

$$n_{\text{догрів}} = Q_{\text{догр.}} / (Q_{\text{тн}} / \text{COP}_{\text{ном.}} * \text{COP}_2) = 0,637 / (16 / 3,5 * 4,133) = 3,4 \% \quad (3.5)$$

З урахуванням цього, кількість теплової енергії, що залишається на підігрів всього об'єму води в баку:

$$Q_{\text{нагр.}} = Q_i * (1 - n_{\text{догрів}}) = 18,89 * (1 - 0,034) = 18,256 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.6)$$

Тут також проводиться перевірка, на результуючу температуру в теплоакumuлюючому баку, і якщо в результаті вона перевищить задану ( $55 \text{ }^\circ\text{C}$ ), кількість теплової енергії корегується.

Відповідно, доля теплової енергії, що виробляється тепловим насосом, і використовується для нагріву теплоакumuлюючого баку, за винятком догріву поступаючої холодної води:

$$n_{\text{нагріву}} = 96,6 \%$$

Загальна кількість теплової енергії, що надійде до теплоакumuлюючого баку в дану годину:

$$Q_i = Q_{\text{нагр.}} + Q_{\text{догр.}} = 0,637 + 18,256 = 18,894 \text{ кВт}\cdot\text{год.} \quad (3.7)$$

Результуючий COP:

$$\text{COP}_{\text{рез.}} = (\text{COP}_1 * n_{\text{нагр.}} + \text{COP}_2 * n_{\text{догр.}}) / (n_{\text{нагр.}} + n_{\text{догр.}}) = 4,133 \quad (3.8)$$

Відсоток завантаження теплового насосу та споживання електроенергії - розраховуємо аналогічно.

Всі наступні ітерації розрахунків, для кожної години - розраховуються аналогічно, результати розрахунків представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати моделювання процесу нагріву теплоакumuлюючого баку тепловим насосом, ітерація I.

Година	Температура баку °С	COP	Вироблено теплової енергії, кВт·год	Водорозбір, л	Витрата електроенергії, кВт·год
00:00	5,00	4,13	18,89	210,21	4,571
01:00	13,29	4,13	18,89	66,24	4,571
02:00	21,20	3,89	17,79	48,23	4,571
03:00	28,44	3,53	16,15	20,86	4,571
04:00	35,03	3,17	14,48	30,27	4,571
05:00	40,61	2,96	13,51	50,98	4,571
06:00	45,25	2,89	13,19	92,46	4,571
07:00	48,76	3,16	14,45	200,57	4,571
08:00	50,23	3,32	15,20	244,34	4,571
09:00	50,87	3,36	15,37	252,59	4,571
10:00	51,32	3,49	15,93	281,31	4,571
11:00	51,28	3,48	15,92	279,66	4,571
12:00	51,27	3,37	15,41	253,29	4,571
13:00	51,66	3,14	14,37	201,21	4,571
14:00	52,76	3,37	15,41	255,64	4,571
15:00	52,89	3,08	14,06	188,97	4,571
16:00	54,02	3,08	14,10	194,92	4,571
17:00	54,89	3,29	14,35	226,09	4,367
18:00	55,00	3,47	15,86	291,19	4,571
19:00	54,12	3,22	14,74	221,39	4,571
20:00	54,61	3,49	15,93	285,65	4,571
21:00	53,96	3,52	16,10	299,58	4,571
22:00	53,14	3,55	16,21	301,06	4,571
23:00	52,47	3,57	16,30	307,80	4,571
Підсумково	43,91	3,40	284,28	4804,5	109,51

На графіку (рисунок 3.6) відображено, процес підігріву води в теплоакumuлюючій ємності тепловим насосом, а також водорозбір на потреби ГВП з баку.

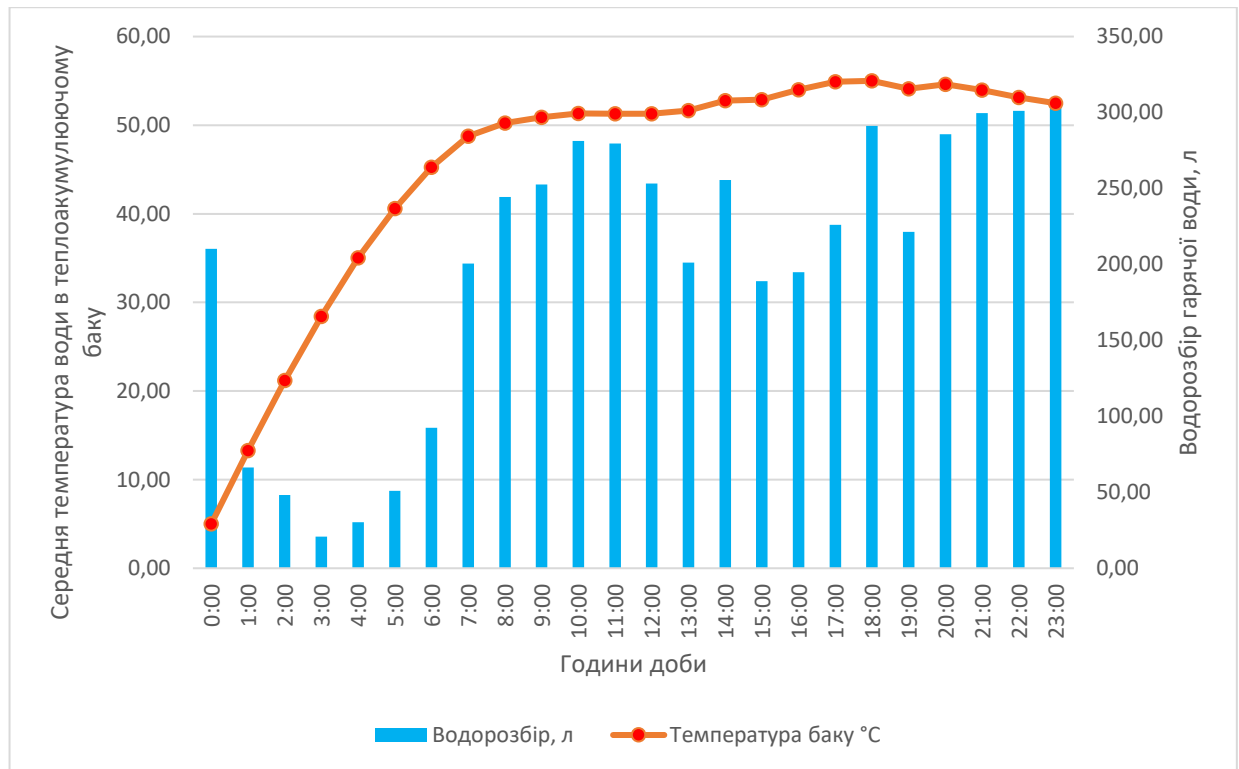


Рисунок 3.6 – Динаміка температур води в теплоакumuлюючій ємності, і водорозбору для I ітерації розрахунку

Змодельовано погодинний нагрів теплоакumuлюючого баку тепловим насосом, на протязі доби, при заданій початковій температурі води в баку – 5 °C.

На наступному етапі ми проводимо аналогічне моделювання, початковою температурою води в баку на 00:00 годину буде кінцева температура води в баку з урахуванням попереднього розрахунку – 51,78 °C.

Виконавши розрахунки, аналогічні попереднім, але вже з нагрітим баком, отримуємо результати, представлені в таблиці 3.3.

Дані розрахунків також представлені на графіку (рисунок 3.7) спостерігається, що з 2:00 до 8:00 температура теплоакumuлюючого баку – досягає максимуму, і тепловий насос працює з неповною потужністю. При значному водорозборі, особливо в вечірні години – з 19:00 до 23:00 температура в баку падає до 52,46 °C, в ці години потужності теплового насосу недостатньо для компенсації витрат гарячої води в баку.

Таблиця 3.3 – Результати моделювання процесу нагріву теплоакumuлюючого баку тепловим насосом, ітерація II.

Година	Температура баку °С	COP	Вироблено теплової енергії, кВт·год	Водорозбір, л	Витрата електроенергії, кВт·год
00:00	51,78	3,19	14,57	210,21	4,571
01:00	52,74	2,58	9,85	66,24	3,818
02:00	55,00	2,94	3,80	48,23	1,292
03:00	55,00	2,67	2,21	20,86	0,828
04:00	55,00	2,79	2,76	30,27	0,988
05:00	55,00	2,96	3,96	50,98	1,339
06:00	55,00	3,12	6,37	92,46	2,042
07:00	55,00	3,26	12,64	200,57	3,876
08:00	55,00	3,31	15,15	244,34	4,571
09:00	54,99	3,37	15,42	252,59	4,571
10:00	54,88	3,49	15,95	281,31	4,571
11:00	54,30	3,51	16,04	279,66	4,571
12:00	53,89	3,38	15,44	253,29	4,571
13:00	53,93	3,12	14,28	201,21	4,571
14:00	54,74	3,38	15,45	255,64	4,571
15:00	54,61	3,19	12,78	188,97	4,004
16:00	55,00	3,28	12,32	194,92	3,755
17:00	55,00	3,30	14,13	226,09	4,285
18:00	55,00	3,47	15,85	291,19	4,571
19:00	54,12	3,22	14,74	221,39	4,571
20:00	54,61	3,49	15,93	285,65	4,571
21:00	53,96	3,52	16,10	299,58	4,571
22:00	53,14	3,55	16,21	301,06	4,571
23:00	52,46	3,57	16,30	307,80	4,571
Всього	54,34	3,24	298,25	4804,5	90,228

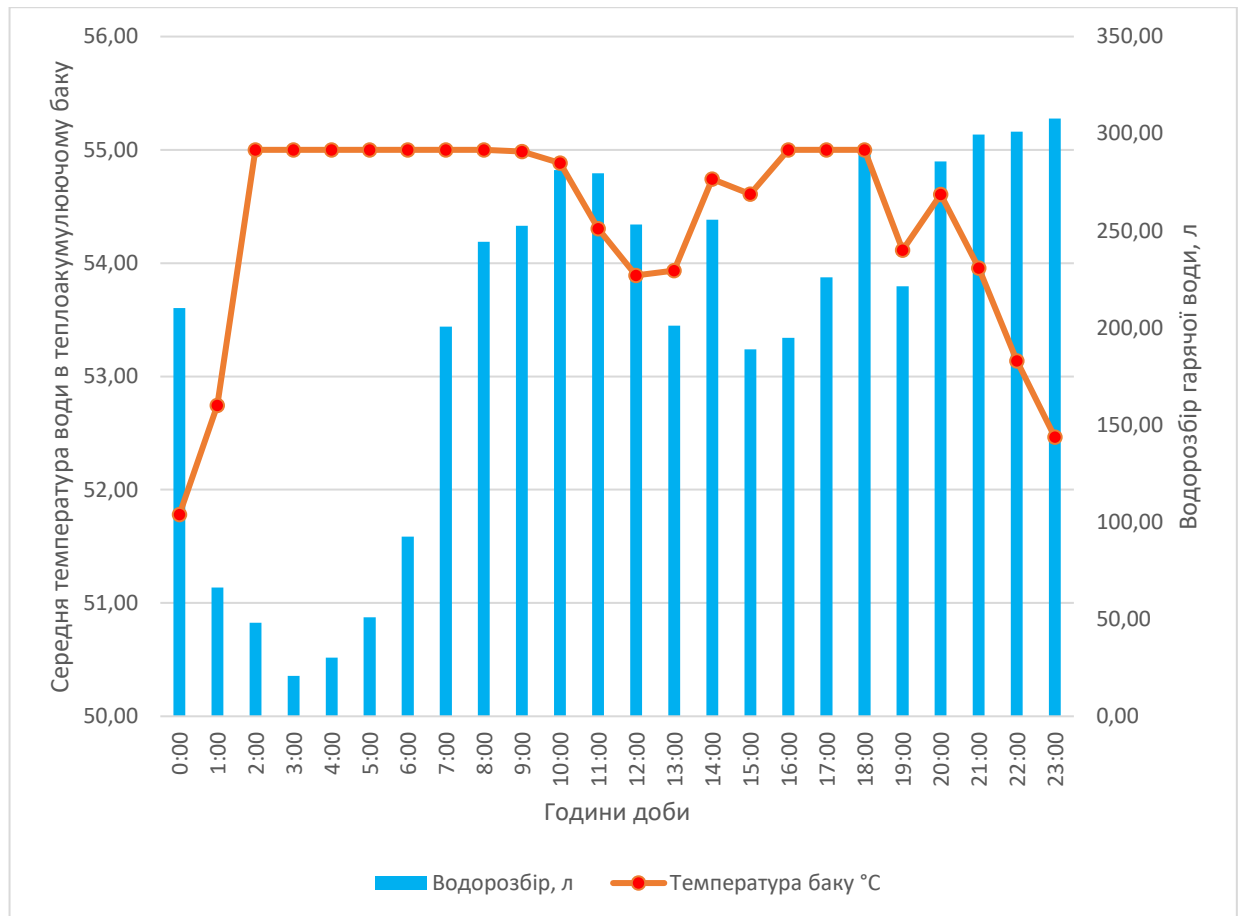


Рисунок 3.7 – Динаміка температур води в теплоакumuлюючій ємності, і водорозбору для II ітерації розрахунку

Результати розрахунків показують, що:

1. Різниця між кінцевою температурою води в попередньому розрахунку на 23:00 і другим етапом – менше 0,1 % ( $52,466^{\circ}\text{C}$  і  $52,464^{\circ}\text{C}$ ), що свідчить про те, що в даному випадку низька початкова температура на першому етапі розрахунків не вносить вагомій похибки в результуючу температуру води в баку в кінці доби.

2. На протязі доби, температура в теплоакumuлюючому баку коливається від  $51,78^{\circ}\text{C}$  до  $55^{\circ}\text{C}$ , що свідчить про достатність потужності теплового насоса, для покриття потреб ГВП, з урахуванням наявності резервного джерела (теплообмінника ІТП).

3. Усереднений COP роботи теплового насоса на протязі доби – 3,31, що є прийнятним, з урахуванням низької температури зовнішнього повітря.

4. За добу, при виробництві 298,25 кВт·год теплової енергії, споживається 90,23 кВт·год електричної енергії. При цьому, максимальне споживання електричної енергії – 4,57 кВт, що близько до споживання двох електробойлерів.

Таким чином, для встановлення теплового насосу такої потужності, не потрібна модернізація електричних мереж.

Наступним кроком (див. Розділ 3.3) є проведення аналогічних розрахунків для кожного місяця, з урахуванням змінних вхідних даних по температурам зовнішнього повітря, холодної води і споживання гарячої води.

Результати помісячних розрахунків представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати моделювання роботи ТН за кожен місяць року

Місяць року	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Споживання гарячої води за місяць ГВП, м <sup>3</sup>	148,9	146,7	142,2	133,3	120,4	82,8	88,1	89,9	97,6	127,7	110,9	122,0
Споживання Гкал на ГВП, з урахуванням циркуляції, Гкал	10,19	10,07	9,85	8,74	7,56	6,05	6,26	6,34	6,64	8,49	8,28	8,84
Середньомісячний SCOP	3,31	3,40	3,68	3,85	4,19	4,18	4,25	4,23	4,06	4,15	3,67	3,40
Середня температура теплоакumuлюючого баку °С	54,3	53,7	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0
Споживання електроенергії, кВт·год	2797	2628	2443	1795	1512	1092	1139	1164	1293	1967	1949	2302
Виробництво теплової енергії., кВт·год	9246	8926	8992	6913	6335	4567	4837	4921	5251	8159	7157	7827

Результати показують, що кількість теплової енергії, що різниця в кількості теплової енергії, що виробляється тепловим насосом взимку (січень – 9246 кВт·год) і влітку (червень – 4567 кВт·год) перевищує щомісячні тепловтрати системи циркуляції ГВП, що дозволяє в літні місяці використовувати тепловий насос і для забезпечення системи циркуляції ГВП, що також покращить економічні характеристики проекту.

За результатами розрахунків, розраховані наступні економічні параметри.

а) При комерційних тарифах:

Тариф на електроенергію - 6,2 грн/кВт·год

Тариф на теплову енергію - 3959,45 грн/Гкал (3,4 грн/кВт·год).

Вартість 1 кВт встановленої потужності ТН - 48 000 грн.

В дану вартість входить: вартість теплового насоса, допоміжного обладнання, теплоакumuлюючого бака, монтажні та проєктні роботи.

Результуючий звіт по економічним параметрам представлено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Економічні характеристики проєкту

Інвестиції, грн	768 000
Річна економія теплової енергії, кВт·год	83 130
Річна витрата електроенергії, кВт·год	22 081
Річна економія, грн	146 112
Проста окупність, років	5,3
При існуючих тарифах для населення:	
Річна економія, грн	59 077
Проста окупність, років	13,0

COP роботи теплового насоса буде мінімальним взимку - 3,31 в січні, і максимальним влітку – 4,25 в липні (див.рис.3.8).



Рисунок 3.8 – Помісячні середньозважені значення коефіцієнту ефективності роботи ТН

Це пояснюється, динамікою температур зовнішнього повітря – низькопотенційного джерела тепла теплового насосу.

На наступному графіку (рисунок 3.9) відображено виробництво теплової енергії тепловим насосом, та споживання електричної енергії ним, помісячно.

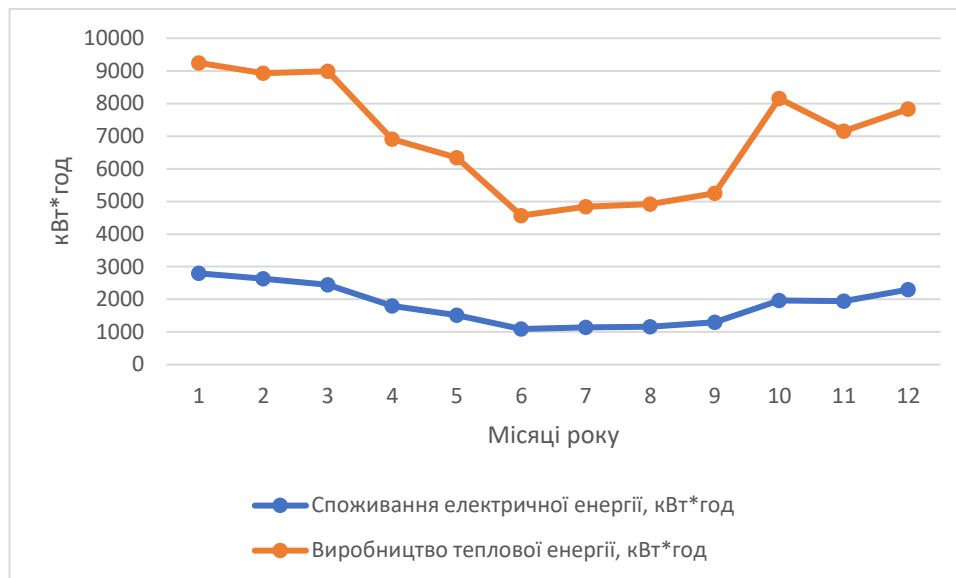


Рисунок 3.9 – Виробництво теплової енергії та споживання електроенергії тепловим насосом

Різниця між максимальним і мінімальним виробництвом теплової енергії – 9246 кВт·год в січні і 4567 кВт·год - в червні. Така різниця, в 102,5 % пояснюється в першу чергу – різницею в споживанні гарячої води в ці місяці (148,9 м<sup>3</sup> в січні і 82,8 м<sup>3</sup> в червні). Другою причиною є різниця в температурі холодної води, що надходить в теплоакumuлюючий бак.

При цьому, різниця між споживанням електричної енергії в січні і червні - більш суттєва - 2797,1 кВт·год в січні і 1091,6 кВт·год в липні – 156,2 %. Це пояснюється тим, що при різниці в виробництві теплової енергії в 102,5 %, існує різниця в ефективності роботи теплового насоса на підігрів гарячої води в залежності від температури зовнішнього повітря: при середній температурі в січні -4,7 °С, усереднений COP теплового насоса становить 3,31, а при +18,3 в червні - 4,18, з урахуванням режимів роботи.

З проведених розрахунків можна зробити наступні висновки:

1. Потужності теплового насоса 16 кВт теплової енергії, і теплоакumuлюючого баку 2000 л, при вище вказаних заданих параметрах і характеристиках, в цілому достатньо для забезпечення потреб в ГВП на протязі року, за винятком січня і лютого, коли середня температура в баку знижується до 54,3 °С і 53,7 °С відповідно, при підігріві системи циркуляції ГВП - теплоносієм, що надходить централізовано.

Влітку тепловий насос здатний забезпечувати і потреби системи циркуляції ГВП.

Таким чином, даної потужності теплового насосу достатньо для забезпечення автономності постачання ГВП влітку, що дозволить зекономити теплову енергію, покращити комфорт мешканців, і не буде необхідності у встановленні та користуванні електричними водонагрівачами.

2. При використанні теплоакumuлюючих баків з сепараторами, і двома теплообмінниками, або двох (і більше) теплоакumuлюючих баків з теплообмінниками, можливо досягти прийнятних показників ефективності роботи теплового насосу навіть при підігріві води для ГВП до температури 55 градусів за рахунок того, що підігрів холодної води, що підігрівається першочергово, відбувається з високим COP.

3. Споживання електричної енергії для потреб теплового насосу, що здатний забезпечити тепловою енергією будівлю на 43 квартири - 4,571 кВт, що лише на 14 % вище, ніж електроспоживання двох одночасно працюючих типових електробойлерів. При цьому, можна допустити, що в періоди відсутності ГВП, споживання електроенергії бойлерами в пікові (вечірні) години становить на порядок більшу величину, за рахунок того, що більшість квартир після відключень централізованого ГВП на декілька місяців в попередні роки, оснащені індивідуальними водонагрівачами.

### 3.2.3 Моделювання роботи теплового насосу в якості джерела теплової енергії на потреби ГВП та опалення будівлі

В попередньому підрозділі було розглянуто моделювання роботи теплового насосу на підігрів теплоакumuлюючого баку, на прикладі об'єкта дослідження.

Відповідно до розділу 2.2., проведено розрахунки роботи теплового насосу, що працює в якості джерела теплової енергії, і підігріває як теплоакumuлюючий бак, так і теплоносій в зворотному трубопроводі системи опалення (рис.3.11)

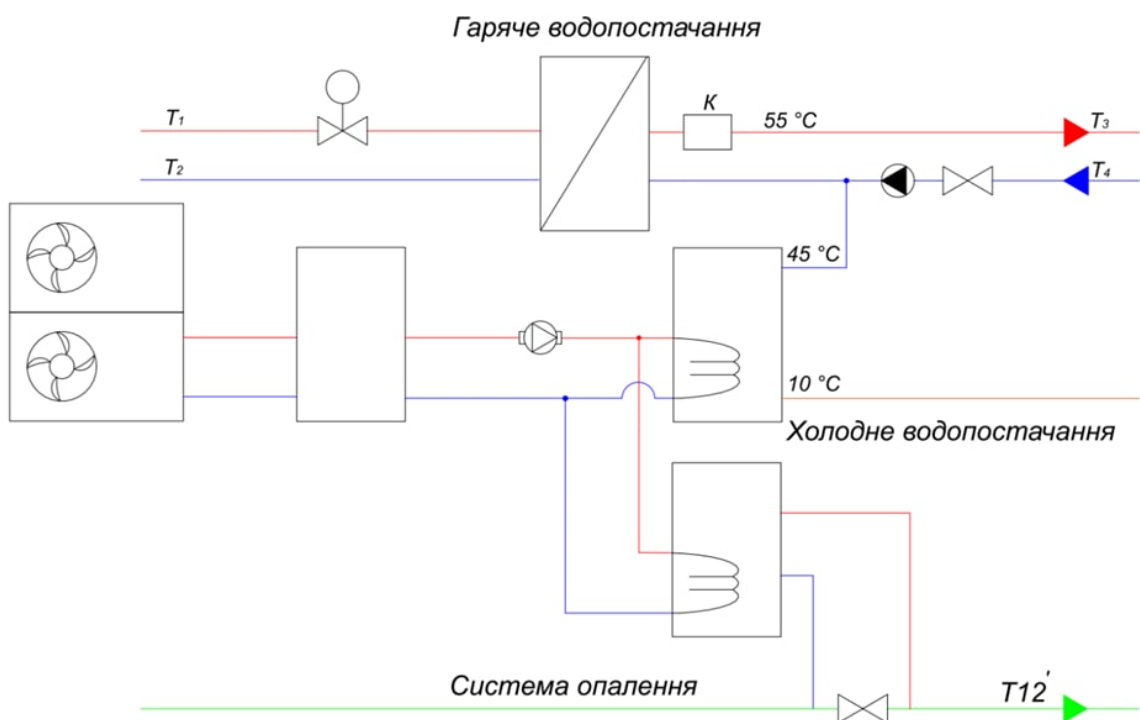


Рисунок 3.10 – Принципова схема підключення ТН до ІТП будівлі

$$1) \text{ Для січня } P_{\text{оп}} = Q_{\text{оп}}/T_{\text{міс}} * 1163 = 30,31/744 * 1163 = 47,38 \text{ кВт} \quad (3.9)$$

$$t_{\text{оп1}} = t_{\text{догр24j}} + 1 = 34,1 + 1 = 35,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

2) Розраховується COP роботи теплового насосу при підігріві ЗТСО до даної температури.

$$\text{COP}_{\text{теор.0.i}} = 3,115$$

3) Розраховується кількість теплової енергії, що буде здатний виробити тепловий насос при даному COP, з урахуванням припущень, описаних в п.2.2. розділу 2.

$$Q_{оп.1} = Q_{ТН}/COP_{ном.} COP_{теор.оп.1} * 0,75 = 16/3,5 * 3,115 \times \\ \times 0,75 = 10,68 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.10)$$

4) Розраховується теоретична температура догріву ЗТСО, з урахуванням вище розрахованої кількості теплової енергії, що буде передана тепловим насосом системі опалення:

$$t_{теор.} = t_{зв.} + (t_{зв.} + (t_{зв.}/P_{оп} * (t_{под} - t_{зв.}))) = 33 + (33/47,38 \times \\ \times (40,515 - 33,3)) = 34,93. \quad (3.11)$$

5) Розраховується середня температура, між температурою догріву і початковою температурою ЗТСО:

$$t_{теор.сер.} = (t_{теор.} + t_{зв.})/2 = (34,93 + 33,3)/2 = 34,11 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.12)$$

6) Розраховується COP роботи теплового насосу, відповідно уточнений для даної температури:

$$COP_{теор.оп.1} = 3,174$$

7) Проводиться моделювання підігріву теплоакumuлюючого баку, аналогічно розрахункам в попередньому розділі, але температура нагріву баку обмежена температурою догріву ЗТСО + 1 градус.

Таким чином, температура в баку не може перевищувати температуру ЗТСО більше ніж на 1  $^{\circ}\text{C}$ .

8) Підраховується відсоток теплової енергії, що витрачається на підігрів теплоакumuлюючого баку тепловим насосом по відношенню до кількості теплової енергії, що ТН здатний виробити:

В даному випадку, на 00:00 годину це буде 43 %, 41,1 % з яких витрачається на підігрів поступаючої холодної води внаслідок водорозбору.

9) Теоретична кількість теплової енергії, що буде вироблена тепловим насосом на потреби СО в цю годину буде дорівнювати:

$$Q_{теор.} = Q_{ТН}/COP_{ном.} COP_{теор.оп.1} * (1 - \eta_{гвп}) = \\ = 16/3,5 * 3,174 * (1 - 0,43 \%) = 8,26 \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (3.13)$$

10) Розраховується теоретична температура догріву ЗТСО, з урахуванням вище розрахованої кількості теплової енергії, що буде передана тепловим насосом системі опалення, аналогічно (4), але за основу вже береться кількість теплової

енергії, розрахована в (9), тобто з урахуванням розподілу теплової енергії між підігрівом теплоакumuлюючого баку і системи опалення:

$$t_{\text{теор.2}} = 34,6.$$

Проводяться розрахунки, за формулами (5)-(9).

Отримується фактична температура догріву ЗТСО. Розрахунок показав, що подальші ітерації недоцільні (різниця в точності - менше 0,5 %):  $t_{\text{догр.факт.}} = 34,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Подальшими кроками, аналогічно розрахункам з попереднього підрозділу, визначаються:

- Результуючий COP роботи теплового насосу
- Відсоток завантаження теплового насосу, з розбиттям між підігрівом СО і теплоакumuлюючим баком
- Витрати електроенергії ТН кожної години
- Кількість виробленої теплової енергії ТН кожної години.

Результати розрахунків представлені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати моделювання процесу нагріву теплоакumuлюючого баку і зворотного трубопроводу системи опалення

Година	Температура баку, $^\circ\text{C}$	Температура догріву ЗТСО ТН $^\circ\text{C}$	COP	Вироблено теплової енергії, кВт·год	Водорозбір, л	Витрата електроенергії, кВт·год
00:00	35,19	34,56	3,49	15,94	210,21	4,571
01:00	35,12	34,99	3,26	14,92	66,24	4,571
02:00	35,56	35,06	3,23	14,78	48,23	4,571
03:00	35,99	35,31	3,19	14,58	20,86	4,571
04:00	36,06	35,20	3,20	14,64	30,27	4,571
05:00	36,31	35,23	3,24	14,81	50,98	4,571
06:00	36,20	35,00	3,30	15,11	92,46	4,571
07:00	36,23	34,61	3,48	15,90	200,57	4,571
08:00	36,02	34,43	3,55	16,21	244,34	4,571
09:00	35,81	34,40	3,56	16,27	252,59	4,571
10:00	35,61	34,28	3,60	16,45	281,31	4,571
11:00	35,40	34,27	3,59	16,43	279,66	4,571
12:00	35,28	34,35	3,55	16,24	253,29	4,571
13:00	35,27	34,54	3,47	15,87	201,21	4,571
14:00	35,35	34,26	3,55	16,24	255,64	4,571

15:00	35,54	34,69	3,46	15,81	188,97	4,571
16:00	35,34	34,47	3,46	15,81	194,92	4,571
17:00	35,69	34,52	3,52	16,07	226,09	4,571
18:00	35,48	34,16	3,61	16,49	291,19	4,571
19:00	35,52	34,55	3,51	16,04	221,39	4,571
20:00	35,32	34,12	3,60	16,44	285,65	4,571
21:00	35,55	34,21	3,63	16,59	299,58	4,571
22:00	35,34	34,19	3,63	16,58	301,06	4,571
23:00	35,21	34,12	3,63	16,61	307,80	4,571
Всього	35,60	34,56	3,47	380,85	4804,5	109,714

Після проведення розрахунків для кожного місяця, отримуємо результуючу таблицю (таблиця 3.7), де відображено, на відміну від таблиці з роботою теплового насоса лише на потреби ГВП – також долю покриття енергопотребы в опаленні тепловим насосом.

Таблиця 3.7 – Результати моделювання роботи ТН на потреби ГВП та опалення для кожного місяця року

Місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Споживання гарячої води за місяць ГВП, м <sup>3</sup>	148,9	146,7	142,2	133,3	120,4	82,8	88,1	89,9	97,6	127,7	110,9	122,0
Споживання теплової енергії на опалення, Гкал	30,31	27,38	10,45								29,12	28,16
Середньоміс. SCOP	3,47	3,56	3,95	3,85	4,19	4,18	4,25	4,23	4,06	4,15	3,89	3,58
Середня температура теплоакumuлюючого баку °С	35,6	35,9	34,6	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	35,6	35,7
Доля покриття енергопотребы в опаленні тепловим насосом	17,5%	16,8%	67,7%								25,2%	22,9%
Доля покриття енергопотребы ГВП тепловим насосом (без циркуляції)	61%	62%	59%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	61%	61%
Споживання електроенергії, кВт·год	3401	3072	3401	1795	1512	1092	1139	1164	1293	1967	3291	3401
Виробництво теплової енергії., кВт·год	11806	10945	13435	6913	6335	4567	4837	4921	5251	8159	12806	12190

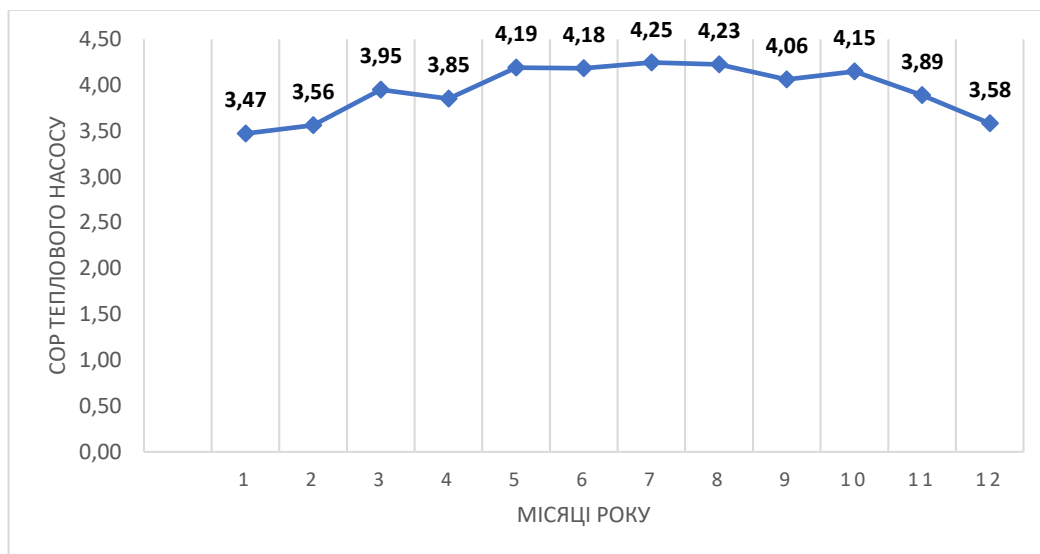


Рисунок 3.11 – Середньомісячний COP роботи теплового насосу на протязі року

При порівнянні даного графіку з попереднім, спостерігається, що середній COP в опалювальний сезон в даному сценарії - вище. Що підтверджує гіпотезу, що тепловий насос, що працює і на потреби опалення, і на потреби ГВП, буде працювати ефективніше.

Зведення по економічній частині:

Для врахування додаткових витрат на підключення контурів теплового насосу і теплообмінників до системи опалення, вартість 1 кВт теплової потужності теплового насосу прийнято на 4000 грн вище, ніж при розрахунку теплового насоса на ГВП, таким чином загальна вартість проєкту – вища на 64 тис. грн. Економічні параметри проєкту представлені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Економічні параметри впровадження ТН на потреби опалення і ГВП.

Інвестиції, грн	832 000
Річна економія теплової енергії, кВт·год	102 164
Річна витрата електроенергії, кВт·год	26 530
Річна економія, грн	183 335
Проста окупність, років	4,54
При існуючих тарифах для населення:	
Річна економія, грн	74 232
Проста окупність, років	11,2

Але, навіть при вищій вартості проєкту, розрахована проста окупність - нижча, ніж у сценарії, коли тепловий насос працював лише на потреби ГВП. Це пояснюється як вищим усередненим SCOP в опалювальний сезон, так і тим, що тепловий насос в опалювальний сезон в даному сценарії завантажений цілодобово на 100 %, а при роботі лише на підігрів ГВП, в деякі періоди він був недовантажений.

Підсумовуючи результати проведених розрахунків зроблено наступні висновки:

1) Використання теплового насоса комбіновано на потреби опалення і ГВП – більш економічно доцільне, ніж виключено на потреби ГВП, при заданих параметрах.

Це може бути не так лише за умови, якщо температура зворотного трубопроводу системи опалення на протязом всього опалювального опалення – вище 50-55 градусів.

Чим нижча температура подачі і зворотки системи опалення – тим більш доцільно використовувати тепловий насос для забезпечення потреб в опаленні.

2) Для об'єкту, що розглядається, з урахуванням фактичних даних про споживання теплової енергії і ГВП, встановлення теплового насоса потужністю 16 кВт, економічно доцільне, і при тарифах на електроенергію - 6,2 грн/кВт·год, і на теплову енергію – 3959,45 грн/Гкал – простий строк окупності такого проєкту складе 4,5 років.

При діючих тарифах для населення строк окупності складе 11,2 роки.

### **3.2.4 Моделювання сценаріїв проєкту зі зміною вхідних параметрів**

Основною перевагою розробленої математичної моделі, порівняно з наявним програмним забезпеченням є гнучкість в можливості зміни вхідних параметрів, незалежно один від одного.

Були проведені моделювання ряду сценаріїв зі змінами вхідних параметрів для визначення наступних залежностей:

## 1. Залежність строку окупності і економії від потужності теплового насосу.

Ціль дослідження – визначити оптимальну з точки зору окупності потужність теплового насосу, шляхом введення різних значень потужності.

З одної сторони, чим менша потужність ТН, тим до менших температур нагрівається теплоакumuлюючий бак і теплоносій в системі опалення тепловим насосом, що збільшує COP теплового насосу. З іншої сторони – абсолютна величина економії буде тим більша, чим більшу кількість теплової енергії буде покривати виробництво тепловим насосом.

Таблиця 3.9 – Залежність техніко-економічних характеристик проєкту від потужності встановленого ТН

Потужність ТН, кВт	10	12	16	24	30	40	60
Вироблено теплової енергії, кВт·год	80672,3	88057,9	102164,4	129218,9	147054,2	173626,4	219991,1
Спожито електроенергії, кВт·год	20154,4	22335,0	26529,9	34616,3	40240,4	48678,5	63683,3
Доля покриття загальної енергопотребы	37%	40%	46%	59%	67%	79%	99%
Річний SCOP	4,00	3,94	3,85	3,73	3,65	3,57	3,45
Річна економія, грн	149 692	161 317	183 335	225 306	251 158	289 307	354 126
Окупність, років	3,47	3,87	4,54	5,54	6,21	7,19	8,81

*\*В даному розрахунку не враховано падіння питомої вартості теплового насосу і допоміжного обладнання з ростом його потужності.*

Даний розрахунок корисний в першу чергу для визначення доцільної потужності теплового насосу для досягнення більшої економії теплової енергії, і економії коштів з одної сторони, і для того щоб залишатися в рамках прийнятної потужності – з іншої.

Варто відзначити, що на відміну від кількості теплової енергії, що економиться, розраховану окупність в подальшому необхідно корегувати з урахуванням долі витрат, яка не змінюється чи змінюється мінімально в залежності від потужності встановлюваного теплового насосу, а також зміну питомої вартості одиниці встановленої потужності самого теплового насосу, в залежності від

потужності – вона не є лінійною. Таким чином, збільшення строку окупності з ростом потужності теплового насосу може бути не так явним.

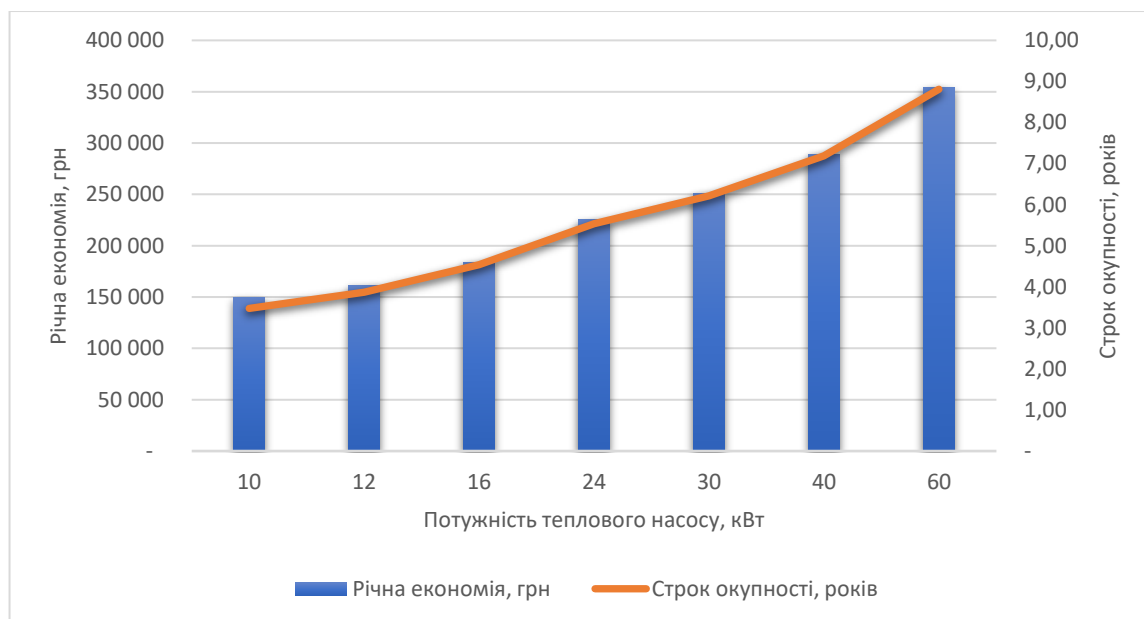


Рисунок 3.12 – Залежність економічних характеристик проєкту від встановленої потужності теплового насосу

2. Залежність строку окупності від тарифу на теплову енергію та вартості природного газу.

Вартість теплової енергії відіграє ключове значення в економічних характеристиках проєктів з енергозбереження і встановлення відновлюваних джерел енергії, в тому числі теплових насосів.

Шляхом внесення в математичну модель різної вартості теплової енергії, при інших незмінних параметрах можна вивести залежність зміни строку окупності проєкту в залежності від її вартості:

Таблиця 3.10 – Залежність техніко-економічних характеристик проєкту від вартості теплової енергії

Вартість теплової енергії, грн/Гкал	1654,41	2200	2600	3400	3959,45	5000	6000
Вартість теплової енергії, грн/кВт·год	1,42	1,89	2,24	2,92	3,40	4,30	5,16
Річна економія, грн	-19153	28775	63913	134189	183335	274742	362588
Строк окупності, років	-43,44	28,91	13,02	6,20	4,54	3,03	2,29

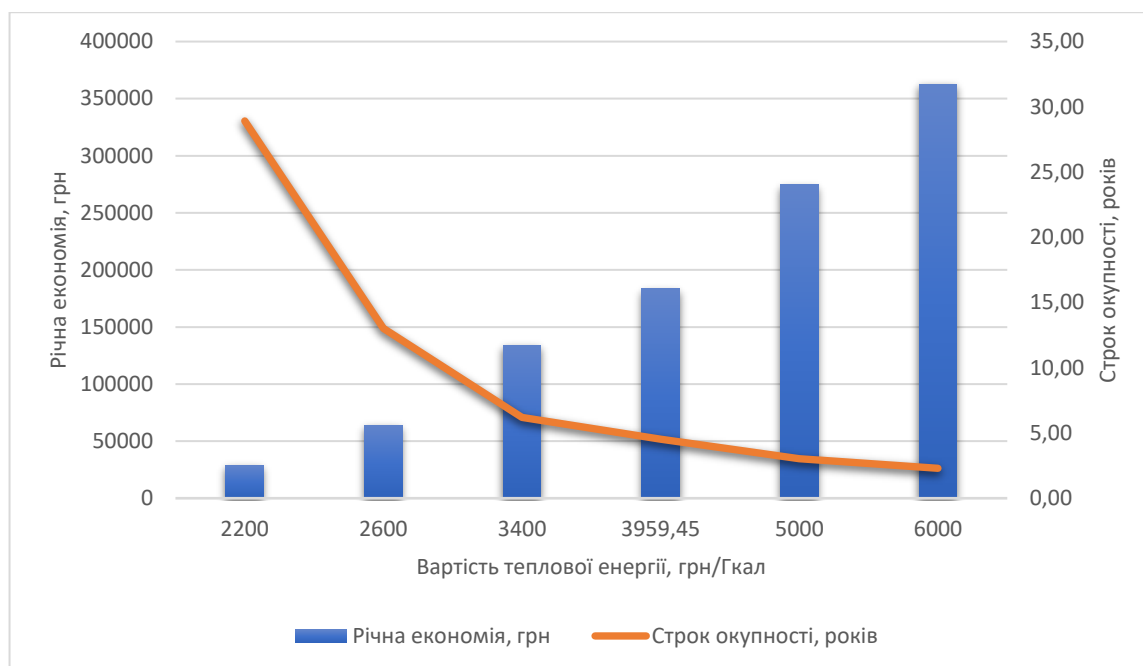


Рисунок 3.13 – Залежність економічних характеристик проекту від вартості теплової енергії

Дані розрахунків свідчать, що при вартості теплової енергії на нинішньому рівні для населення, за незмінності інших параметрів (в тому числі і розрахункової вартості електроенергії на рівні 6,2 грн/кВт·год), проєкт є економічно недоцільним.

При вартості теплової енергії 2600 грн/Гкал, строк окупності складатиме більше 13 років, при 3400 грн/Гкал – вже 6,2 роки, а при 5000 грн/Гкал – 3,03 роки.

Таким чином, коректне прогнозування тарифів на теплову енергію - є дуже важливим фактором для розрахунку економічної доцільності подібних проєктів, і розроблена мат. модель може розрахувати оптимальні параметри під різні сценарії тарифної політики і ринкових реалій.

Оскільки тариф на теплову енергію нерозривно зв'язаний з вартістю енергоносія, з якого вона виробляється, а для переважної більшості міст України це, на даному етапі – природний газ, проведемо аналогічний розрахунок, використовуючи за основу вартість природного газу.

Емпіричний показник, виходячи з аналізу звітів ряду Теплоенерго: на відпуск споживачам 1 Гкал теплової енергії затрачується 142 м<sup>3</sup> природного газу. Витрати на природний газ складають 70 % від вартості теплової енергії. Дані

параметри були прийняті в якості допущення, і, відповідно, розраховано залежність окупності проєкту з встановлення теплого насосу від динаміки вартості природного газу.

Таблиця 3.11 – Залежність техніко-економічних характеристик проєкту від вартості природного газу

Вартість природного газу, грн/м <sup>3</sup>	8,5	11	14	18	20	23	30
Вартість теплової енергії, грн/кВт·год	1,48	1,92	2,44	3,14	3,49	4,01	5,23
Річна економія, грн	-13015	31536	84996	156276	191916	245377	370118
Строк окупності, років		26,38	9,79	5,32	4,34	3,39	2,25

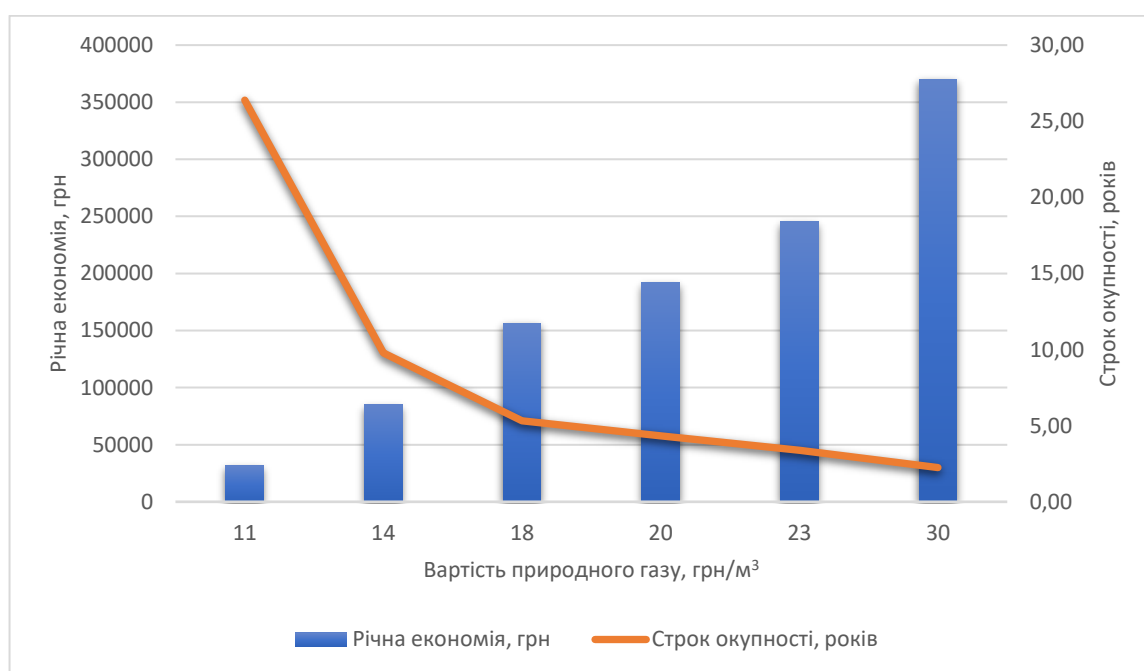


Рисунок 3.14 – Залежність економічних характеристик проєкту від вартості природного газу

### 3. Залежність строку окупності проєкту від тарифу на електричну енергію.

Оскільки тепловий насос використовує електричну енергію для роботи, динаміка вартості електричної енергії буде значно впливати на доцільність проєктів, з використанням теплових насосів для виробництва теплової енергії.

Таблиця 3.12 – Залежність техніко-економічних характеристик проєкту від вартості електричної енергії

Вартість електроенергії, грн/кВт·год	2,68	3,50	5,00	6,00	7,00	8,00	10,00
Річна економія, грн	276720	254965	215171	188641	162111	135581	82521
Строк окупності, років	3,01	3,26	3,87	4,41	5,13	6,14	10,08

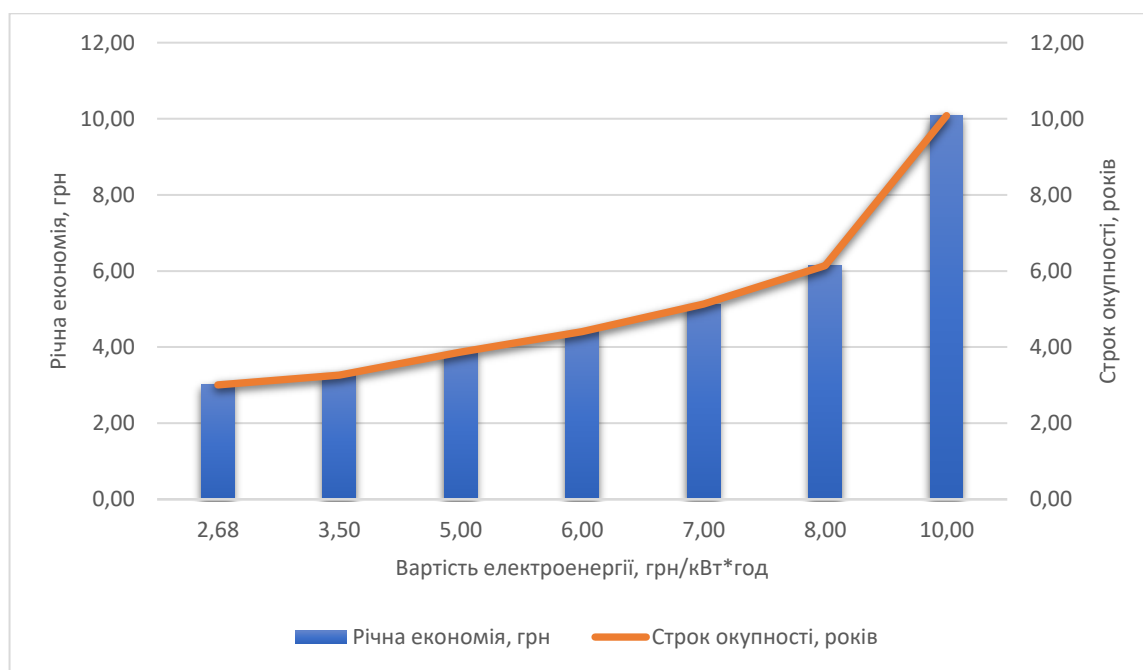


Рисунок 3.15 – Залежність економічних характеристик проєкту від вартості електроенергії

4. Залежність економії і строку окупності проєкту від температурного графіку системи опалення.

Оскільки коефіцієнт ефективності роботи теплового насоса є функцією від температур зовнішнього середовища і теплоносія, що нагрівається, зниження температури останнього дозволяє підвищити ефективність роботи ТН, а отже – економічні показники. Як при будівництві нових будівель, так і при реконструкції системи опалення існуючих будівель, і заходах термомодернізації, перехід на низькотемпературні системи опалення потребують додаткових капіталовкладень. Розроблена математична модель дозволяє розраховувати сценарії з різним температурним графіком для оцінки доцільності таких заходів.

Для даного моделювання було використано тепловий насос з тепловою потужністю 30 кВт.

Було змодельовані наступні сценарії:

Сценарій 1: Близька по параметрам будівля не мала б налаштованого ІТП, і температури в системі трубопроводів подачі і зворотного трубопроводу - на 10 градусів вище.

Сценарій 2: Неутеплена будівля, в якій температури в системі трубопроводів подачі і зворотного трубопроводу – на 17 градусів вище.

Сценарій 3: Нова будівля з системою опалення на основі "теплої підлоги", з температурами в системі опалення на 8 градусів нижче.

Таблиця 3.13 – Залежність техніко-економічних характеристик проекту від температурного графіку системи опалення

	Середні температури подавального та зворотного трубопроводу системи опалення, °С					Строк окупності, років
	Січень	Лютий	Березень	Листопад	Грудень	
Поточний сценарій	40,5	39,9	34,7	39,2	40,1	6,21
	33,3	33,9	30,9	33,0	33,0	
Сценарій 1	50,5	49,9	44,7	49,2	50,1	7,33
	43,3	43,9	40,9	43,0	43,0	
Сценарій 2	57,5	56,9	51,7	56,2	57,1	8,36
	50,3	50,9	47,9	50,0	50,0	
Сценарій 3	32,5	31,9	26,7	31,2	32,1	5,43
	25,3	25,9	22,9	25,0	25,0	

З отриманих результатів можна зробити висновок, зміна температурного графіку суттєво впливає на окупність проекту. Так, в неутепленому будинку без ІТП, або з не налаштованим ІТП, з температурами в системі опалення в середньому на 17 градусів вищою, ніж в досліджуваному об'єкті, строк окупності складатиме при тих же параметрах 8,36 років проти 6,21 роки в досліджуваній будівлі.

Дані розрахунки дають змогу оцінити як економічну доцільність реконструкції системи опалення, так і кумулятивний ефект, що виникає при одночасній термомодернізації будівлі, встановленні і налаштуванні ІТП, що дозволяють знизити температурний графік, при встановленні теплового насосу.

### **3.2.5 Загальні висновки за результатами моделювання**

В ході моделювання було проаналізовано залежності економічних параметрів проєкту від ряду вхідних даних, таких як тарифи на енергоносії, потужність теплового насоса, температурний графік системи опалення будівлі. Результати моделювання представлені у вигляді таблиць і графіків і дозволяють проаналізувати доцільність впровадження проєкту при різних сценаріях як динаміки ринку енергоносіїв, так і термомодернізації будівлі.

Результати проведених розрахунків свідчать про те, що використання теплових насосів для забезпечення ГВП та опалення в багатоквартирних будинках економічно обґрунтовано за умов ринкових тарифів на тепло, при правильному підборі потужності теплового насосу, об'єму теплоакumuлюючих баків і параметрів допоміжного обладнання, строк окупності становить менше 7-8 років.

Оптимальним є використання теплових насосів в системах теплозабезпечення будинків, при якій тепловий насос працює і на ГВП, і на опалення, таким чином, щоб максимізувати час використання встановленої потужності теплових насосів.

Інтеграція теплового насосу в існуючу систему теплопостачання будинку потребує модернізації ІТП, що дозволяє використовувати енергію з теплової мережі як резервне джерело.

### **3.3 Багатоквартирний будинок на 40 квартир в м. Луцьк**

Наступним об'єктом дослідження було обрано багатоквартирний житловий 5-поверховий будинок у м. Луцьк (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 – Зовнішній вигляд фасаду будівлі

Для встановлення теплового насоса із використанням тепла з вентиляції, розглядається житловий будинок, де налічується 40 квартир. Точна кількість жителів будинку достеменно невідома, і ми для точності розглядаємо її із розрахунку 2,5 людини / квартиру, що приблизно відповідає статистиці забезпечення кв. м. житла на людину з урахуванням теперішньої демографічної ситуації. Отже, розрахунки споживання гарячого водопостачання проводимо з кількості 100 жителів у будинку.

Будинок неутеплений, зовнішні стіни виконані із силікатної цегли, вікна та балконні двері найчастіше металопластикові з різними типами та формулами скління.

Підігрів теплоносія для опалення і води для потреб ГВП здійснюється в індивідуальному тепловому пункті будинку за незалежною схемою, що сприятливо для включення теплового насоса в систему підготовки ГВП/опалення. Підігрів холодної води здійснюється через теплообмінник, куди приходить гостра вода з джерела централізованого тепlopостачання. Усереднені температури гарячої води, що відпускається споживачам, становлять 55 °С, а тієї, що повертається з системи циркуляції ГВП, – 40 °С.

Усереднена температура в подавальному трубопроводі системи опалення становить 53 °С, у зворотному трубопроводі – 41 °С.

Основні вхідні дані по енергопотребі будівлі, представлено в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Вхідні дані по характеристикам системи теплопостачання

Показник/місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Споживання теплової енергії, Гкал	43,2	32,79	31,52	7,34	0	0	0	0	0	0	39,4	30,7
Споживання ГВП, куб. м.	84,5	29,6	60,45	12,59	60,9	48,3	27,7	45,6	43,1	47	92,0	38,2
Температура в подавальному трубопроводі, °С	55,0	52,3	50,2	51,3	0	0	0	0	0	0	52,7	56,8
Температура в зворотному трубопроводі, °С	45,9	42,4	39,4	39,6	0	0	0	0	0	0	37,4	40,2

Встановлена теплова потужність опалення (максимальна, розрахункова): 0,138 Гкал/год

Встановлена теплова потужність ГВП (середня):  $Q_{\text{ГВП}} = 0,0183$  Гкал/год (фактична); 0,024 (середня, розрахункова) Гкал/год

Було розглянуто 3 сценарії – в першому, тепловий насос працює тільки на забезпечення потреб ГВП, в другому і третьому – також на часткове покриття енергопотребі опалення. Сценарії відрізняються також встановленою тепловою потужністю теплових насосів. Оптимальним сценарієм вибрано Сценарій 2 (див. Рисунок 3.18), технічні і економічні показники роботи ТН надано для всіх сценаріїв в таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Техніко-економічні показники

Сценарії	Сценарій 1	Сценарій 2	Сценарій 3
Встановлена теплова потужність ТН, кВт	12	20	32
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	6,12		
Вартість теплової енергії, грн/Гкал	3651,4		
Вартість теплової енергії, грн/кВт·год	3,14		
Вартість встановленої теплової потужності ТН, \$/кВт	1500		
Курс \$, грн	40		
Інвестиції, грн	780 000	1 260 000	1 980 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	28 058	36 996	50 860
Річна економія теплової енергії, кВт·год	89 732	122 520	180 857
Економія коштів, грн/рік	110 013	158 256	180 857
Проста окупність, років	7,09	7,96	10,95

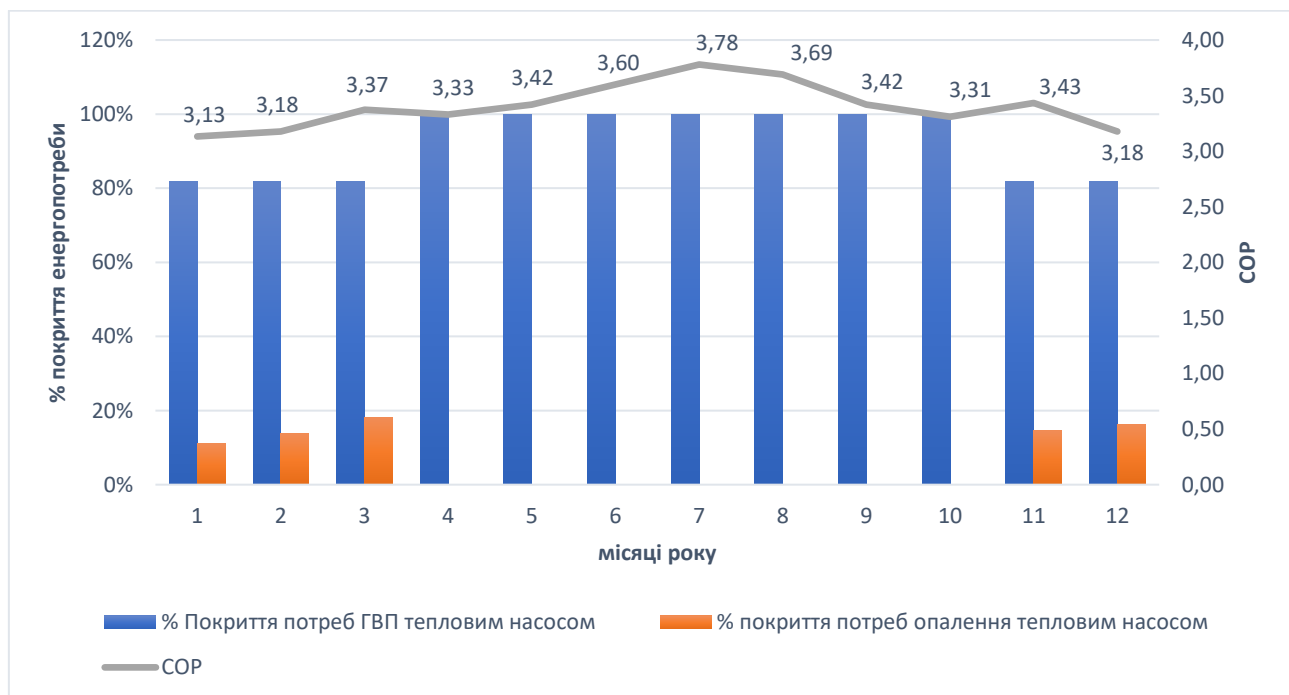


Рисунок 3.17 – Покриття енергетичних потреб ГВП та опалення тепловим насосом (Сценарій 2 - оптимальний)

Розрахунки показують, що використання витяжного повітря в якості джерела теплової енергії для теплового насосу дозволяє значно підвищити ефективність роботи ТН в опалювальний період, особливо в зимові місяці. Однак,

в багатоквартирних будинках це потребує досить складних попередніх технічних робіт з виходами витяжних шахт, окрім того, без постійно працюючої механічної вентиляції повітряний потік є складно прогнозованим. З урахуванням необхідності розміщення зовнішнього блоку на даху будинку, і розміщення ІТП в підвалі будинку, ефективність схеми може бути нижчою, особливо в високих будинках. Крім того, кількість теплової енергії від витяжного повітря обмежена, і необхідне використання теплової енергії з зовнішнього повітря для забезпечення ГВП і оптимальної долі потреби в опаленні.

Використання витяжного повітря в якості джерела тепла найбільш доцільно в будівлях з наявною і працюючою механічною вентиляцією і можливістю підігріву припливного повітря теплотою скидною теплотою від витяжного – в великих комерційних та промислових приміщеннях з централізованою системою вентиляції.

### **3.4 ЦТП в м. Луцьк**

Об'єктом дослідження є центральний тепловий пункт в м. Луцьк (рис.3.18) зі встановленою тепловою потужністю 1,482 Гкал/год, що забезпечує будинки району тепловою енергією на потреби опалення і ГВП.

Оператор центрального тепlopостачання модернізує центральні теплові пункти (ЦТП), замінює теплообмінники, циркуляційні насоси та впроваджує системи автоматизації. Запропонований проєкт має на меті встановлення теплових насосів (ТН) типу "повітря-вода" тепловою потужністю 210 кВт для забезпечення більш ефективного та екологічно чистого рішення для нагріву гарячої води. Це допоможе знизити витрати енергоносіїв на підготовку гарячої води.



Рисунок 3.18 – Карта мікрорайону, що користується послугами ЦТП

Цілорічно користувачами послуги з постачання гарячої води буде 21 житловий будинок (1752 абоненти та 3969 зареєстрованих користувачів), КП «Луцький клінічний пологовий будинок» із 392 працівниками та 321 ліжкомісцями, дитячий садок №27 «Незабудка» із 40 працівниками та 299 користувачами гарячої води, Волинський обласний ліцей з посиленою військово-фізичною підготовкою із 300 працівниками та 560 користувачами послуги, військова частина (інформація про користувачів не публічна) та КЗ «Луцька міська бібліотека» із 9 працівниками.

Принципова схема включення ТН в ЦТП представлена на рисунку 3.20.

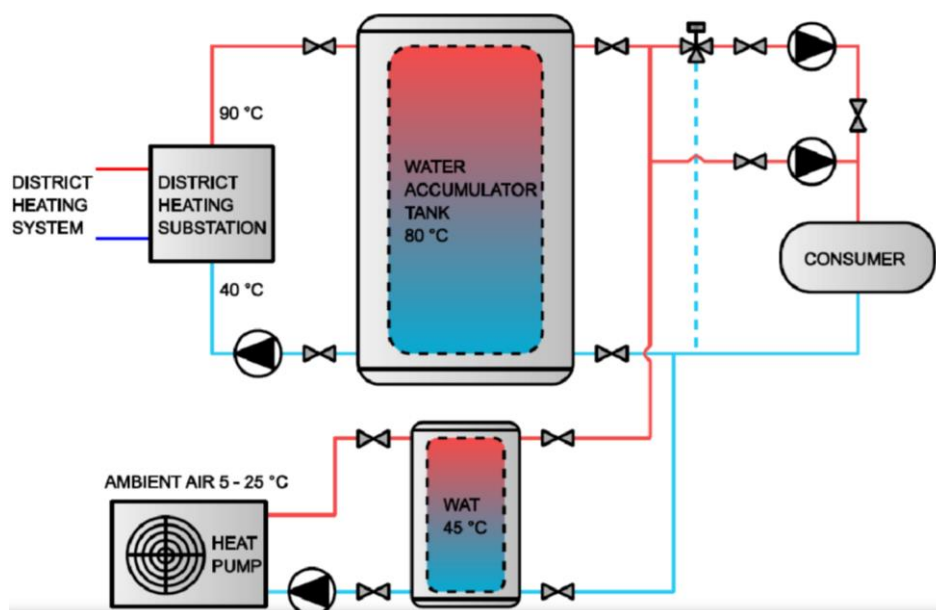


Рисунок 3.19 – Принципова схема включення ТН в ЦТП

Центральний тепловий пункт забезпечує постачання гарячої води своїм споживачам з 6:00 до 22:00 години. Середньодобовий відпуск гарячої води на ЦТП становить 150-200 м<sup>3</sup>.

Підігрів холодної води здійснюється через теплообмінник, куди приходять гаряча вода з джерела централізованого тепlopостачання. Усереднені температури гарячої води, що відпускається споживачам – 54 °С, і що повертається з системи циркуляції ГВП – 43 °С.

Основні вхідні дані по енергопотребі об'єкту дослідження, і фактичному температурному графіку системи опалення представлено в таблиці 3.16:

Таблиця 3.16 – Вхідні дані щодо енергопотребі об'єкту дослідження

Показник/місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Виробництво ГВП, куб. м.	5817	5969	3558	4458	4728	4418	1912	4035	4138	5548	6348	5758
Споживання електроенергії, кВт·год	3704	3489	3480	3544	3660	3471	1808	3930	3313	2974	3495	2523

Дозволена електрична потужність: 120 кВт.

Встановлена теплова потужність: 1,482 Гкал/год

Температури теплоносія фактичні (усереднені по року): T1=60 °С. T2=45 °С. T3=54 °С. T4=43 °С.

Реалізація проекту передбачає встановлення теплового насоса (насосів) типу повітря-вода з тепловою потужністю 210 кВт для використання його в якості джерела теплової енергії для попереднього підігріву гарячої води. Для акумулювання тепла передбачається встановлення 8 теплоакumuлюючих баків об'ємом по 5 000 л (сумарного об'єму 40 000 л). Схема підігріву аналогічна підготовці гарячої води в ІТП багатоквартирних будинків – підігріта в баках вода при водорозборі направляється на теплообмінник ГВП в ЦТП, де догрівається до нормативної температури гарячої води (55 градусів) і направляється споживачам.

На рисунку 3.21 представлена доля теплової енергії, що буде вироблятися тепловим насосом по відношенню до кількості необхідної теплової енергії на потреби ГВП:

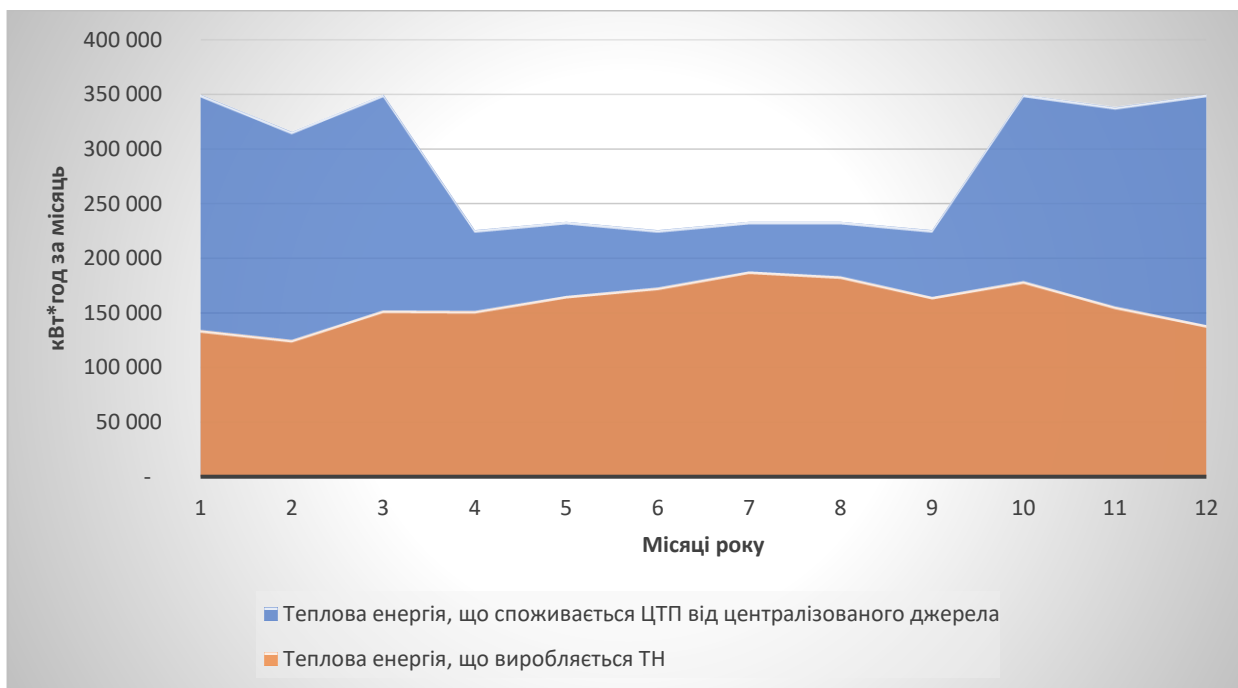


Рисунок 3.20 – Розподіл частки теплової енергії на потребу ГВП між централізованим джерелом теплової енергії та тепловим насосом

В таблицях 3.17-3.18 представлено узагальнені результати розрахунків, що демонструють, розраховану усереднену ефективність роботи теплового насосу, температуру догріву води в теплоакumuлюючому баку ТН, і долю теплової енергії, що можливо заощадити завдяки роботі теплового насосу.

Таблиця 3.17 – Техніко-економічні характеристики проекту

Технічні показники:	
Встановлена теплова потужність ТН, кВт	210
Встановлена електрична потужність ТН, кВт	60
Об'єм теплоакumuлюючих ємностей, що встановлюються, м <sup>3</sup>	40
Середньорічний SCOP роботи теплового насосу	3,625
Середня температура догріву води в опалювальний сезон, °C	37
Середня температура догріву води в неопалювальний сезон, °C	49
Розрахункове покриття енергопотребы ГВП ТН-ом в неоп.сезон	74%
Розрахункове покриття енергопотребы ГВП ТН-ом в оп.сезон	44%

Таблиця 3.18 – Фінансові характеристики проекту

Фінансові показники:	
Інвестиції, грн	13 800 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	538 560
Річна економія теплової енергії, Гкал	1 640
Річна економія теплової енергії, кВт·год	1 906 992
Економія коштів, грн/рік	2 692 356
Проста окупність, років	5,13

Проекти з використанням теплових насосів з інтеграцією в ЦТП, для попереднього підігріву ГВП – аналогічно використанню їх в багатоквартирних будинках – доцільний і економічно обґрунтований захід, з прийнятним терміном окупності при ринкових тарифах на енергоносії.

Переваги такого рішення:

- Можливість його інтеграції в систему опалення там, де немає, і не передбачається встановлення ІТП в окремих будівлях.

- Використання ТН більшої потужності дозволяє, за рахунок масштабування, знизити капітальні витрати як на обладнання ТН, так і на допоміжне обладнання і монтаж.

- Шум від зовнішнього блоку потужного обладнання – віддалений від житлового будинку.

- Більша кількість споживачів ГВП забезпечує більшу рівномірність водоспоживання і дозволяє оптимізувати краще оптимізувати підбір ТН і баків, і їх роботу.

### **3.5 Багатоквартирний будинок на 172 квартири з газовою котельною в м. Костопіль**

Об'єктом дослідження є багатоквартирний житловий будинок, що отримує теплову енергію на потреби опалення від газової котельної (рис.3.21).



Рисунок 3.21 – Зовнішній вигляд фасаду будівлі

Таблиця 3.19 – Дані про об'єкт

Дата будівництва	1986 р.	Фактичне річне споживання теплової енергії на потреби опалення	780 Гкал/рік
Поверховість	6-9,2		
Кількість квартир	172	Розрахункова потужність на опалення	0,46 Гкал/год
Загальна площа	9387,4 м <sup>2</sup>	Споживання ГВП на людину	1,6 м <sup>3</sup>
Загальний об'єм	36111 м <sup>3</sup>	Кількість мешканців	430
Площа скління	863 м <sup>2</sup>	ГВП	Не надається

Підігрів теплоносія для опалення здійснюється у котельні, розташованій за тією ж адресою, що і будинок. Також в котельні є обладнання для постачання ГВП за незалежною схемою, що сприятливо для включення теплового насоса в систему підготовки ГВП, проте зараз ГВП не надається.

Основні вхідні дані по енергопотребі об'єкту дослідження, і фактичному температурному графіку системи опалення представлено в таблиці 3.20.

Таблиця 3.20 – Дані про споживання теплової енергії і температурний графік об'єкту дослідження

Показник/місяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Споживання теплової енергії, Гкал	164	147	127	37	0	0	0	0	0	45	104	156
Температура в подавальному трубопроводі, °С*	55	56	49	45	-	-	-	-	-	45	45	52
Температура в зворотному трубопроводі, °С*	43	44	38	35	-	-	-	-	-	37	38	42

Реалізація проектів комбінованого виробництва тепла, з інтеграцією теплових насосів в котельні (будинкові і мікрорайонні) передбачає встановлення теплового насосу (насосів) типу повітря-вода. Джерелом низькопотенціальної теплової енергії буде служити повітря навколишнього середовища. Теплові насоси будуть покривати частину енергопотреби в опаленні, що дозволить зекономити природний газ на котельній.

Також передбачається відновлення централізованого постачання гарячої води, що доцільно для оптимальної ефективності роботи теплового насосу. Для кожного сценарію прораховано «альтернативний варіант», в якому подання ГВП не передбачається.

Передбачається встановлення термоакумуючих баків, в яких нагрівається холодна вода, що призначена для підготовки ГВП.

Запрограмовується логіка перемикання нагріву теплообмінників, в залежності від температур. Тепловий насос гріє воду в теплоакумуючих баках (що йде на потреби ГВП), і коли температура в них досягає температури в зворотному трубопроводі системи опалення +1 °С, робота теплового насосу переключється на підігрів води зворотного трубопроводу системи опалення. Також, система може працювати паралельно на підігрів теплообмінників і ГВП, і опалення.

На рисунку 3.23 представлено результати розрахунків значень ефективності роботи ТН і % покриття енергопотребы в ГВП і опаленні тепловим насосом.

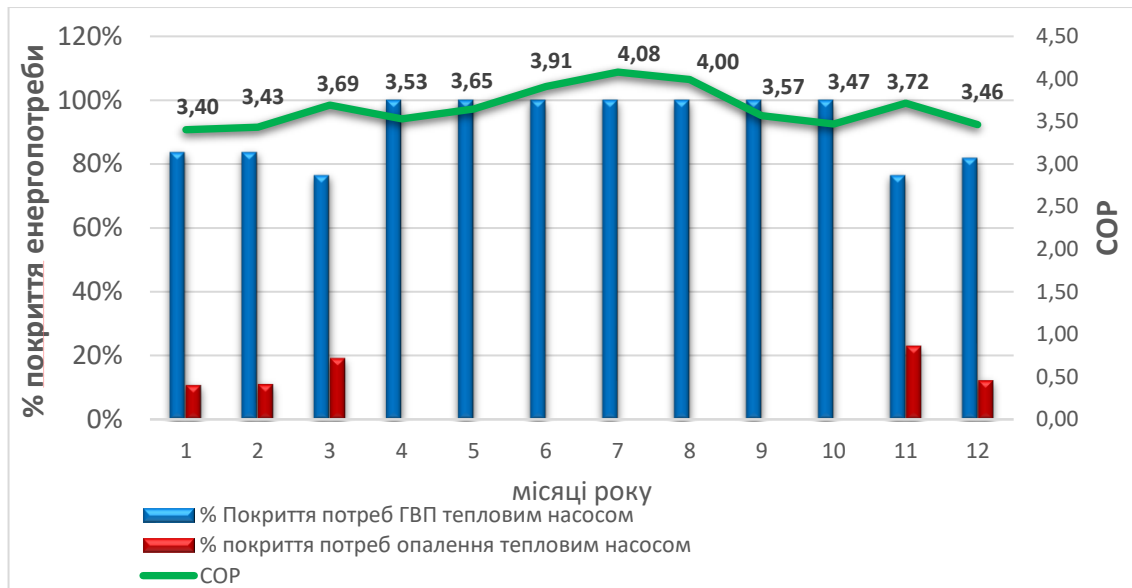


Рисунок 3.22 – Покриття енергопотребы ГВП та опалення тепловим насосом (Сценарій 1)

В таблиці 3.21 представлено параметри і результати розрахунків по двом сценаріям: перший сценарій передбачає встановлення теплового насоса потужністю 80 кВт, другий – 125 кВт. Перевагою першого сценарію є більший коефіцієнт використання встановленої потужності теплового насоса на протязі року, перевагою другого сценарію – забезпечення більшої долі забезпечення енергопотребы будівлі тепловим насосом, і, відповідно, більші абсолютні показники економії теплової енергії і коштів.

Таблиця 3.21 – Техніко-економічні характеристики проекту

Сценарії	Сценарій 1	Сценарій 2
Встановлена тепла потужність ТН, кВт	80	125
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	6,12	
Вартість природного газу, грн/м <sup>3</sup>	18,5	
Вартість встановленої теплової потужності ТН, \$/кВт	1500	
Курс \$	40	
Інвестиції, грн	4 800 000	7 500 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	148 291	196 134
Річна економія теплової енергії, Гкал	511 670	649 695
Економія коштів, грн/рік	698 931	839 484
Проста окупність, років	6,87	8,93

Теплові насоси ефективно інтегруються з газовими котельними, аналогічно їх інтеграції з ЦТП. Економічні параметри таких проектів залежать від вартості газу, що використовується в котельні. Також, робота теплового насосу в котельних, які працювали виключно в опалювальний період, на потреби опалення, дозволяє вигідно забезпечити відновлення ГВП, що є оптимальним варіантом для цілорічного використання теплового насосу, і дозволяє зекономити значну кількість електроенергії, у порівнянні з варіантом використання електричних водонагрівачів.

В разі, якщо котли потребують модернізації/заміни – при встановленні теплових насосів, при модернізації буде доцільно підбирати котли меншої потужності, що також знижує витрати в майбутньому.

### **3.6 Використання теплових насосів типу «грунт-вода» для автономного забезпечення житлового комплексу тепловою енергією – м. Хмельницький, містечко для переселенців**

Об'єктом дослідження є житловий комплекс, що проєктується. На етапі проєктування прораховується можливість встановлення теплових насосів.

Зібрані вхідні дані, що характеризують загальну енергопотребу містечка, і параметри окремих його будівель представлені в таблиці 3.22

Таблиця 3.22 – Вхідні дані про містечко

Кількість будівель	10	Кількість мешканців на будинок	33
Габарити будівель	Довжина – 25 м Ширина – 14,7 м Висота – 9,4 м	Розрахункова енергопотреба на опалення одної будівлі	33 кВт
Поверховість	3	Споживання ГВП на людину	1,6 м <sup>3</sup>
Утеплення будівель	Згідно ДБН В.3.6-31:2021	Загальна теплова потужність ТН	400 кВт
Строк побудови	2024 р.	Необхідна електрична потужність	140 кВт
Централізоване опалення і ГВП	Передбачене		



Рисунок 3.23 – Схема містечка

Згідно результатів моделювання, після проведення розрахунків енергопотреби будівель, для гарантованого забезпечення нормативної температури в будинках при  $-22^{\circ}\text{C}$  температури зовнішнього повітря і ГВП, повністю виключно тепловими насосами, необхідно забезпечити теплову потужність з розрахунку 38 кВт на будинок, сумарно 380 кВт, з урахуванням мережевих тепловтрат – 400 кВт. Був проведений аналіз геології ґрунтів ділянки і, з урахуванням їх властивостей, розраховано необхідну довжину скважин, їх кількість, за умови, що глибина скважин – 50 м, оптимальну відстань між скважинами і площу ділянки для буріння, що буде достатньою для покриття цих потреб, за умови, що форма ділянки – квадрат. Результати розрахунків представлені в таблиці 3.23:

Таблиця 3.23 – Технічні характеристики проекту

Потужності теплового насосу	
Загальна потужність ТН, кВт	400
Необх. ел. потужність, кВт	140
Параметри буріння	
Загальна довжина скважин, м	5285,8
Кількість скважин	106
Відстань між скважинами, м	7,5
Площа ділянки для скважини, м <sup>2</sup>	5962,5

З урахуванням залежності ефективності роботи ТН від температурного графіку, а також можливість встановлення газової котельної в якості резервного джерела для температур зовнішнього повітря нижче  $-4^{\circ}\text{C}$ , було проведено декілька моделювань для різних сценаріїв проєкту. Змінним параметром був температурний графік системи опалення – для системи опалення з радіаторами в якості опалювальних приладів в квартирах температурний графік 40/60, для системи з теплими підлогами – 26/35. Для сценарію з наявним резервним джерелом – загальна теплова потужність ТН і довжина геотермальних скважин були знижені на 40 %. Результати розрахунків представлені в таблицях 3.24 і 3.25.

Таблиця 3.24 – Фінансові характеристики проєкту з тепловими насосами в якості єдиного джерела опалення

Грунт - вода - автономно, без резервного джерела		
Показник	Радіатори	Тепла підлога
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	6,12	
Вартість природного газу, грн/м <sup>3</sup>	18,5	
Вартість встановленої теплової потужності ТН, \$/кВт	1500	
Курс \$	40	
Інвестиції, грн	28 800 000	26 520 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	233362	198757
Річна економія теплової енергії, кВт·год	834779,4	834779,4
Економія коштів, грн/рік	1 407 060	1 821 359
Проста окупність, років	18,85	14,56

Таблиця 3.25 – Фінансові характеристики проєкту з тепловими насосами в комбінації з резервним джерелом в якості джерела опалення

Грунт - вода - в комбінації з резервним джерелом		
Показник	Радіатори	Тепла підлога
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	6,12	
Вартість природного газу, грн/м. куб.	18,5	
Вартість встановленої теплової потужності ТН, \$/кВт	1500	
Інвестиції, грн	18 600 000	17 340 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	211 694	188 819
Річна економія теплової енергії, кВт·год	762098,4	887449,3
Економія коштів, грн/рік	1 292 815	1 858 550
Проста окупність, років	13,41	9,33

\*Витрати на встановлення резервного джерела тепла не враховуються.

По результатам виконаних досліджень і розрахунків, з урахуванням заданих параметрів, аналіз результатів показує, що використання теплових насосів типу «грунт-вода» – ефективний спосіб забезпечити автономне і економічне опалення для житла, при умові наявності достатньої площі ґрунту для буріння скважин і фінансових ресурсів для здійснення капітальних витрат. На відміну від теплових насосів «повітря-вода», при використанні ґрунту в якості джерела тепла можливо ефективно забезпечити енергопотребу в опаленні навіть в найбільш морозну погоду.

При цьому, є наступні шляхи оптимізації проекту, які значно покращать економічні показники:

1. Розглянути можливість використовувати резервне джерело тепла. Це може бути газова котельня, або, найбільш простий спосіб – електроТЕНи.

Це дозволить значно зменшити необхідну встановлену потужність теплового насосу, що скоротить інвестиційні витрати на 30-40 %, і значно покращить економічні показники проекту. Але в той же час потребуватиме підведення додаткових мереж.

2. Використання "теплої підлоги" (кращий варіант) або сталевих радіаторів з розрахунку на зниження максимальної температури опалення – значно скоротить як інвестиційні, так і поточні витрати на електроенергію, оскільки ефективність роботи теплових насосів тим вища, тим нижча температура теплоносія в системі опалення.

3. Використання централізованої системи кондиціонування влітку – оптимальний варіант для ґрунтових теплових насосів.

### **3.7. Оцінка впливових факторів на окупність проєктів встановлення теплових насосів**

Після проведення моделювань роботи теплових насосів у різних сценаріях використання, було проаналізовано основні фактори, що впливають на окупність проєктів:

- Температури системи опалення (температурний графік).

Залежність лінійна - чим нижче температурний графік системи опалення, тим ефективніше теплові насоси, тим менший строк окупності, і більшу долю потреб в опаленні здатний замінити тепловий насос.

- Утеплення будівель.

Температура системи опалення – є похідною від теплового опору огорожувальних конструкцій будівлі. Сценарій комплексного утеплення будівлі, особливо з заміною радіаторів – доцільний при плануванні проєктів з встановлення теплових насосів на потреби опалення, оскільки необхідна встановлена потужність, а отже і вартість теплового насосу значно знизиться після термомодернізації, а ефективність роботи ТН виросте.

- Використання теплових насосів в тому числі на потреби ГВП.

У випадку, коли тепловий насос працює і на потреби ГВП, і на потреби опалення, його коефіцієнт використання встановленої потужності – значно вище, ніж при роботі тільки на опалення, оскільки ГВП необхідно на протязі всього року.

Таким чином, доцільно відновлювати централізоване ГВП навіть там, де воно було відключено раніше.

- Доля потреби в опаленні, яку необхідно забезпечити тепловим насосом.

Оскільки COP теплового насосу знижується при зниженні температури зовнішнього повітря, а також при рості температури теплоносія, який підігрівається тепловим насосом, доцільно підбирати його потужність таким чином, щоб він покривав 50-70 % від потреб в тепловій енергії на опалення при температурі  $-4^{\circ}\text{C}$ , а решту енергопотреб покривало резервне джерело, оскільки, тепловий насос який покривав би 100 % від потреб опалення при температурі  $-22^{\circ}\text{C}$ , був би в 4 рази дорожчим, ніж тепловий насос в запропонованому варіанті, а кількість теплової енергії, що він зможе виробити, буде лише на 30 % більшою, ніж в запропонованому сценарії.

- Співвідношення ціни на газ і електроенергію.

Чим більша вартість газу по відношенню до вартості електроенергії – тим більш вигідний тепловий насос по відношенню до газового/централізованого опалення, та централізованого ГВП.

Водночас, вигоди, які дає тепловий насос при відновленні ГВП, у найрозповсюдженішому випадку, коли переважна більшість квартир користується електробойлерами, тим більша, чим вища ціна на електроенергію, що робить теплові насоси максимально ефективним рішенням для ГВП, практично незалежно від ціни на газ.

З урахуванням проведеного аналізу, найбільш ефективним є початок впровадження теплових насосів з наступних будівель:

- Великі будинки, в яких вже проведена або планується термомодернізація.
- Будинки, в яких більшість мешканців користується електробойлерами для ГВП
- Новобудови, з урахуванням їх високого класу енергоефективності, і можливості встановити ТН і необхідні системи ще на етапі будівництва
- Будівлі, віддалені від систем централізованого теплопостачання, трубопроводи СО до яких мають значні тепловтрати.

### **3.8 Додаткові глобальні переваги використання теплових насосів в системах централізованого теплопостачання**

#### **3.8.1 Згладжування піків енергоспоживання**

Основні тези, що опираються на емпіричний досвід і аналіз:

- Переважна більшість квартир, особливо в великих містах, мають електробойлери.
- Майже у всіх мешканців багатоквартирних будинків, електричні водонагрівачі використовується без таймерів, починаючи споживати електроенергію з початком водорозбору.
- Відповідно – в вечірні години, коли всі повертаються з роботи, починають мити посуд, приймати душ, в більшості квартир бойлери вмикаються одночасно.

Цю проблему частково вирішує нічний тариф, який стимулює людей встановлювати таймери, але на даний момент ні з інформаційної, ні з фінансової точки зору, стимули недостатні. Таким чином, ми отримуємо ситуацію, що з в середньому 150 кВт·год, що споживають електробойлери на протязі місяця в квартирі, близько 2/3 цього споживання припадає на період з 19:00 до 23:00, що значно посилює пік споживання в енергосистемі.

При цьому, тепловий насос, при правильному підборі теплоакumuлюючої ємності, працює зі стабільним електроспоживанням на протязі більшої частини доби, таким чином, якщо будинок зі 100 електробойлерами в піковий період ввечері споживав би 150 кВт (75 % одночасно ввімкнутих бойлерів), то тепловий насос для ГВП цього будинку – споживав би 12 кВт електроенергії в цей період.

Значне зниження пікового електроспоживання, завдяки заміні підігріву гарячої води електробойлерами – тепловим насосом – дозволяє знизити:

- потребу в використанні пікових джерел виробництва електроенергії;
- навантаження і вимоги до будинкових систем електропостачання;
- навантаження на районні і міські електромережі.

Окрім цього, COP ТН, порівняно з ефективністю роботи бойлерів, дозволяє скоротити загальне споживання електричної енергії на ГВП в 3-4 рази.

### **3.8.2 Забезпечення резервного/автономного теплопостачання**

В цілому, використання теплових насосів без використання резервного джерела – економічно недоцільно, як мінімум тому що за нормативами необхідна встановлена теплова потужність для "розрахункового навантаження", яке прораховується під компенсацію тепловтрат при розрахунковій температурі зовнішнього повітря (для Києва -22 °С), а взимку середні температури -1-4 °С.

Але існують сценарії, при яких тепловтрати в трубопроводах до будівлі, віддаленої від систем централізованого теплопостачання, достатньо великі, і доцільно встановити тепловий насос що дозволить забезпечувати теплом будівлю до температур вище -5 градусів, а на випадок сильних морозів, встановити ТЕНи або газовий котел, які будуть працювати, фактично, до 30 днів на рік.

### **3.8.3 Комбіноване використання теплових насосів з відновлюваними джерелами електроенергії**

#### **Тепловий насос в комбінації з сонячними електростанціями**

При встановленні СЕС на власне електроспоживання, встановлення теплових насосів дозволяє:

- Забезпечити стабільне навантаження, таким чином можна використовувати більше енергії від СЕС в періоди максимальної інсоляції.
- Запасати більше теплової енергії в теплоакumuлюючому баку вдень, щоб мінімізувати використання електричної енергії в вечірній пік.

#### **Когенерація**

Оскільки графік виробництва е/е когенерацією при теплофікаційному графіку – відносно стабільний, а графік споживання електроенергії має значні коливання, можна використовувати тепловий насос для споживання виробленої електричної енергії, заодно знижуючи потребу у витраті палива когенераційними установками.

#### **Теплові насоси, як додатковий фактор управління споживанням електроенергії**

- Можливість автоматичного відключення ТН в періоди пікового електроспоживання з метою розвантаження мережі.
- Можливість максимізації використання ТН в періоди провалів електроспоживання, низької вартості електроенергії.

### **3.8.4 Непрямі економічні вигоди використання ТН для будівель**

З точки зору сталого розвитку, доцільно враховувати не тільки прямі інвестиції і витрати, але й опосередкований ефект від наступних факторів:

Зниження споживання електроенергії завдяки усуненню причин користування електробойлерами в багатоповерхівах, де існує централізоване ГВП.

Згладжування піків електроспоживання, причиною яких є піки водоспоживання вранці і ввечері.

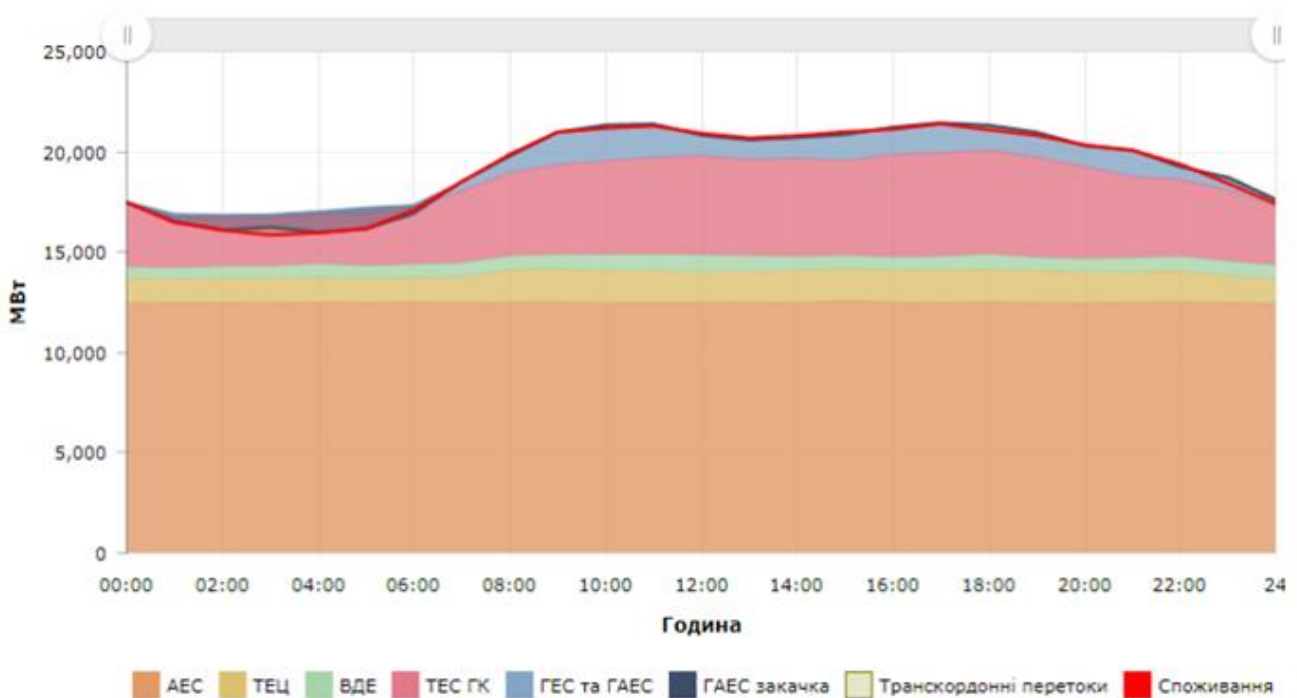


Рисунок 3.24 – Добовий графік виробництва/споживання електроенергії за 15.12.2021 р., за матеріалами НЕК Укренерго

Проведене вивчення ринку електричних водонагрівачів показує, що переважна більшість моделей електробойлерів має потужність 2 кВт. З урахуванням того факту, що більшість домогосподарств не мають двозонного обліку електричної енергії і не можуть скористатися перевагами «нічного тарифу», а також низької обізнаності і зацікавленості населення в сфері можливості використання спеціальних «таймерів» для бойлерів, створюється ситуація, що період найбільшого водорозбору ввечері співпадає з піком електроспоживання.

В Європейському Союзі теплові насоси давно розглядаються як елемент балансування енергоспоживання, що дозволить інтегрувати більшу долю відновлювальних джерел електроенергії з переривчастою генерацією. В Україні в перспективі при побудові «розумної» енергосистеми теплові насоси можуть стати частиною системи балансування енергоспоживання, автоматизовано відключаючись в пікові години/за сигналом з енергосистеми.

Прийmemo, що в будинку зі 100 квартирами, що не має централізованого ГВП, у всіх мешканців встановлені електробойлери потужністю по 2 кВт. Усереднене споживання гарячої води – 1,6 м<sup>3</sup>/людину (що відповідає соціальній нормі), в будинку мешкає 250 людей. Припустимо, 2/3 гарячого водоспоживання припадає на 6 годин доби: з 7:00 до 9:00 і з 19:00 до 23:00, протягом цього часу споживання рівномірне. Розрахункове електроспоживання в будинку становитиме в опалувальний період (тепловтрати з бойлерів приймаються на рівні 15 %) – 26749 кВт·год за місяць, або 891,6 кВт·год за добу. При цьому, пікове електроспоживання, навіть при умові рівномірності вечірнього піку, буде становити 98-100 кВт. Припустимо, що витрати електроенергії електричними водонагрівачами становлять 35-40 % від середньостатистичних витрат електроенергії домогосподарствами. При умові навіть усередненого SCOP роботи теплового насосу – 3, до непрямої вигоди використання ТН можна віднести:

- Зменшення електроспоживання на підігрів ГВП в 3 рази. Таким чином, електроспоживання будинку знизиться на 27 % (при умові, що на електробойлери припадало 40 % електроспоживання);

- Зменшення пікового електроспоживання з 98-100 кВт до 12,4 кВт, для ТН, без використання електроТЕНу для пікового догріву і до 20-25 кВт при використанні ТН в комбінації з ТЕНом для пікового догріву.

Для оцінки непрямих вигод можна розрахувати:

- зміну необхідної підведеної потужності електромереж, при заміні, модернізації або новому будівництві

- вартість додаткової встановленої потужності маневреної генерації, яка може бути вивільнена;

- економія більш дорогої електроенергії в пікові періоди за рахунок як рівномірного розподілу електроспоживання для ГВП на протязі доби, так і за рахунок можливого автоматичного відключення ТН в пікові години (при наявності достатнього об'єму баку або комбінації ТН і централізованого ГВП);

- відсутність необхідності мешканцям будинків встановлювати/обслуговувати/замінювати електричні водонагрівачі.

## 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

### 4.1 Опис ідеї проекту

В даний час, вартість енергоносіїв може стрімко і мало прогнозовано зростати, а вартість технічних рішень з відновлюваних джерел енергії, зокрема, теплових насосів – поступово знижується, і вони набувають більш широкого застосування.

Крім того, виникає необхідність в згладжуванні піків енергоспоживання, і акумулюванні енергії, вартість пікової генерації електроенергії в світі значно вища, ніж вартість базової генерації електроенергії, по причині використання для покриття піків електроспоживання викопного палива, переважно – природного газу.

Багатоквартирні житлові будинки є одним із найбільших споживачів теплової енергії, що виробляється шляхом спалювання природного газу, окрім того, саме споживання електроенергії населенням приводить до виникнення піків електроспоживання.

Використання теплових насосів для забезпечення тепловою енергією житлових будинків, може:

- Знизити витрати природного газу на котельних/ТЕЦ для теплозабезпечення житлових будинків.

- Значно знизити витрати електроенергії в житлових будівлях, і пікове електроспоживання, через відмову від використання індивідуальних електричних водонагрівачів, завдяки підвищенню надійності ГВП.

**Ідея стартапу полягає** в створенні інформаційного порталу для будівельного сектору, підрядних організацій і приватних клієнтів з впровадження енергоефективних рішень та надання консалтингових послуг щодо застосування ТН. Замовник, надіславши дані про об'єкт, отримає інформаційний продукт в вигляді опису ряду сценаріїв, в яких застосування теплового насосу найбільш доцільне для даного об'єкту, а також консультативні послуги щодо оптимальних варіантів впровадження теплонасосних технологій.

Таблиця 4.1 – Зміст ідеї проекту

Напрямки застосування	Вигоди для користувача	Вигоди для держави	Вигоди для електричної енергосистеми
<ul style="list-style-type: none"> <li>- існуючі багатоквартирні житлові будівлі</li> <li>- нові житлові будівлі на етапі будівництва</li> <li>- адміністративні будівлі зі значною потребою в ГВП</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зниження витрат на теплову енергію</li> <li>- надійність централізованого ГВП</li> <li>- відпадає необхідність встановлювати та обслуговувати індивідуальні водонагрівачі (витрати, ризику протікання, вільне місце)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зниження споживання природного газу, що є вартісним енергоресурсом, з обмеженими перспективами видобування</li> <li>- додаткові робочі місця на спеціалістів у сфері монтажу, виробництва, і інжинірінгових послуг</li> <li>- децентралізація виробництва теплової енергії в контексті безпекової ситуації</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- значне зниження пікового споживання за рахунок відмови від використання електричних водонагрівачів</li> <li>- створення можливостей управління попитом на електроенергію для балансування енергосистеми</li> <li>- впровадження стабільного базового навантаження, яке можливо відключати за необхідності, замість "рваного"</li> </ul>

## 4.2 Визначення характеристик-проекту

Техніко-економічні характеристики пропонується визначати у порівнянні з централізованим опаленням і відсутністю централізованого ГВП в неопалювальний період, з використанням мешканцями будівель в цей період електричних водонагрівачів (див.табл.4.2).

Таблиця 4.2 – Переваги та недоліки проекту

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Широка сфера застосування - значна кількість потенційних клієнтів</li> <li>2) З розвитком технологій інвестиції будуть знижуватися</li> <li>3) Європейські стратегії, що встановлюють обов'язкову долю використання відновлюваних джерел енергії в централізованому тепlopостачанні в перспективі будуть актуальні і для України</li> <li>4) Існують інвестиційні програми підтримки впровадження подібних проєктів</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Висока вартість початкових інвестицій</li> <li>2) Необхідність проходження ряду узгоджувальних і дозвільних процедур</li> <li>3) Фіксовані низькі поточні тарифи для населення</li> <li>4) необхідність узгодження питань із великою кількістю власників багатоквартирної будівлі і отримання більшості голосів на зборах ОСББ</li> <li>5) необхідність в додатковій ел.потужності для обладнання</li> <li>6) необхідність додаткового місця для розташування акумулюючих баків.</li> </ul>

### 4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Динаміка ринку: ринок існує в основному для приватного житлового сектору, зацікавленість проявляють власники громадських будівель. Для житлового сектору ринок зароджується. Кількість гравців на ринку – конкуренти практично відсутні. –Зазвичай власники конкретного обладнання пропонують готові рішення, без обґрунтування доцільності установки такого обладнання. Проте для залучення коштів і участі у різних інвестиційних проєктах і програмах необхідним є надання основних техніко-економічних показників проєкту.

Етапи реалізації схожих проєктів – на стадії ЕП, ТЕО.

Таблиця 4.3 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Необхідні фактори, для зацікавленості споживачів
Зниження витрат на енергоносії	Існуючі багатоквартирні житлові будівлі	- Ринкова вартість енергоносіїв - Бажання підвищити надійність ГВП
	Адміністративні/державні будівлі	- Наявність суттєвої долі потреб ГВП в загальній потребі в тепловій енергії - Потреба в системі централізованого охолодження
- Надійність постачання гарячої води відповідно попиту - Охолодження влітку	Будівлі приватної власності	- Наявність суттєвої долі потреб ГВП в загальній потребі в тепловій енергії (готелі, спортзали з душами і басейнами, тощо) - Потреба в системі централізованого охолодження
	Будівельні компанії	- Обізнаність їх потенційних клієнтів в перевагах наявності теплового насосу в системі тепlopостачання - Прогнозна ринкова вартість енергоносіїв

Попередній аналіз ринку і цільових аудиторій показує, що на даний момент, основним перешкоджаючим фактором для впровадження проєктів з використання теплових насосів в системи тепlopостачання багатоквартирних житлових будинків є неринкова вартість енергоносіїв для населення. Це свідчить про перспективи такого роду проєктів після того, як вартість енергоносіїв для населення буде приведена до ринкової.

Для всіх категорій споживачів, значущим критерієм є поінформованість про наявність такого рішення, можливостей економії завдяки і ознайомлення з отриманими результатами розрахунку для об'єктів аналогів.

Важливими факторами, від яких буде залежати схильність потенційних клієнтів до прийняття рішення з інвестування в впровадження теплових насосів для теплозабезпечення об'єкту є:

- Фінальна вартість проєкту;
- Можливість отримання кредитів під пільгові умови;
- Перспективи економії.

Таблиця 4.4 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція
Вартість	Недостатність коштів, термін окупності	Оптимізація вартості шляхом наявності опцій використання обладнання різних цінових категорій Інформування щодо наявних інвестиційних програм підтримки Розрахунки за різних сценаріїв
Складність впровадження	Можливі нетипові технічні рішення, що збільшують вартість і термін впровадження	Пошук типових технічних рішень, налагодження алгоритму отримання дозволів
Конкуренція	Вхід на ринок конкурентів, після появи ринку	Інформування про конкурентні переваги
Недостатність мотивації	Одної лише можливості знизити витрати на енергоносії може бути недостатньо	Створення додаткових можливостей моніторингу для клієнтів, інформування щодо додаткових переваг

Таблиця 4.5 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція
Впровадження законів і стратегій розвитку, що передбачають обов'язкове використання відновлюваних джерел енергії в теплопостачанні, вимоги щодо енергоефективності	Для досягнення існуючих вимог власники будівель зацікавлені впроваджувати сучасні технології; Державні програми підтримки	Адаптація пропозиції під ситуацію, в залежності від зміни умов, готовність до збільшення кількості проєктів і росту конкуренції
Стрімкий розвиток відновлюваних джерел енергії	Стрімке зростання попиту із-за обов'язковості впровадження ВДЕ	
Державні програми стимулювання використання теплових насосів	Зменшення порогу спротиву для прийняття рішень клієнтами за рахунок інформаційної кампанії	
Зниження облікової і кредитних ставок	Зменшення проблемності фактору капітальних витрат, зменшення строку окупності	
Інвестиції західних компаній і фондів в відновлювальні джерела енергії в Україні	Збільшення попиту на рішення	

Таблиця 4.6 – SWOT аналіз

S (сильні сторони)	W (слабкі сторони)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Унікальний деталізований підхід до розрахунку технічних параметрів проєкту і помісячної генерації енергії</li> <li>- Компетенції, що дозволяють максимально точно оцінити енергопотреби об'єкту</li> <li>- Шанс стати лідерами на ринку</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Вартість проєктів</li> <li>- Невеликий досвід реалізації подібних проєктів у Україні</li> <li>- Залежність окупності від слабо передбачуваних факторів</li> </ul>
O (можливості)	T (загрози)
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Впровадження сприятливих законодавчих змін</li> <li>- Іноземні інвестиції</li> <li>- Державні програми стимулювання</li> <li>- вивчення позитивного досвіду в країнах ЄС</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Військова агресія з боку РФ призводить до нестабільності економіки держави</li> <li>- Вірогідність тривалого утримання неринкової вартості енергоносіїв для населення</li> <li>- Потенційна конкуренція при встановленні сприятливих ринкових умов</li> </ul>

#### 4.4 Розроблення ринкової стратегії

Першим кроком передбачається визначення найбільш перспективної цільової групи в нинішній ситуації, з урахуванням поточних тарифів і нормативної бази. З урахуванням всіх факторів, перелічених вище, для багатоквартирних будівель існує достатньо перепон, тому на даному етапі найбільш перспективними групами потенційних споживачів є: комерційні споживачі (наприклад, готелі, особливо з басейнами). При цьому, оптимальним є відпрацювання в цьому сегменті основних технічних рішень і вирішення типових при їх впровадженні технологічних задач, створення технологічних схем, з ціллю набуття досвіду реалізації таких проектів до появи сприятливих ринкових умов для багатоквартирних житлових будівель.

#### 4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.7 – Концепція маркетингової комунікації

Цільові групи	Канали комунікації	Ключові позиції для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Комерційні споживачі (Готелі/спортзали)	Інтернет, громадські організації	Зниження витрат на енергоносії в умовах їх зростання і невизначеності	Підкреслення для потенційного споживача основних актуальних для прийняття рішень з його сторони переваг продукту	економія
Адміністративні заклади		Впровадження енергозберігаючих технологій, сприяння досягненню цілей сталого розвитку		ефективність
Житлові будинки		Забезпечення надійного ГВП, зниження витрат на енергоносії		надійність
Забудовники		Підвищення інвестиційної привабливості їх об'єктів		

## Висновки до розділу 4

Аналіз концепції стартап проекту свідчить про те, що він вже може бути інвестиційно привабливим, за умови ефективної організації роботи стартапу, залучення коштів на маркетингову кампанію.

Навіть за нинішніх ринкових умов, наявна математична модель і принциповий підхід до визначення оптимальної потужності теплового насосу, теплоакumuлюючого баку і інших параметрів проекту, дозволяють визначати такі параметри проектів, при яких їх термін простої окупності при комерційних тарифах складає менше 5 років. Існує недостатньо підстав прогнозувати зниження вартості енергоносіїв в середньостроковій перспективі, і достатньо підстав прогнозувати підвищення вартості тарифів на енергоносії для населення і комунальної сфери. Крім того, з розвитком технологій і досвіду впровадження енергоефективних рішень, їх вартість знижується, що додатково позитивно впливає на окупність проектів. Зростання ринку впровадження ТН як джерел енергії в будівельному секторі можна прогнозувати у разі:

- зростання вартості енергоносіїв до ринкового значення;
- стабілізація безпекової ситуації;
- зниження облікової ставки;
- Ріст іноземних інвестицій;
- Зростання інтересу до відновлюваних джерел енергії;
- Поширення теплових насосів, як будинкових джерел теплової енергії в Європі, особливо в сусідніх країнах;
- Зміна нормативної бази.

Та компанія, що до настання цього моменту буде мати досвід впровадження теплових насосів в системи централізованого опалення і ГВП, в цих умовах буде мати значні переваги як з точки зору компетенцій і досвіду впровадження проектів, так з точки зору налагодженого співробітництва з постачальниками обладнання і підрядними монтажними організаціями, і а також з репутаційної точки зору. Таким чином, у компанії, є значні шанси стати лідером ринку.

## ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації було проведено аналіз існуючого стану ринку теплових насосів в Україні та ЄС, визначено ряд чинників, що мають вплив на стан впровадження теплових насосів в енергосистему різних країн. Проведено огляд існуючих наукових досліджень, що підтверджує актуальність теми, і необхідність створення методики, що дозволяла б розраховувати окупність проєктів з використанням теплових насосів в якості джерела теплової енергії, з одної сторони, достатньо детально, а з іншої – щоб інструмент для проведення таких розрахунків був достатньо простим і універсальним.

Тестування функцій існуючих програмних продуктів показало, що вони, мають достатню гнучкість для розв'язання задачі підбору потужності теплового насосу і теплоакumuлюючого баку для теплопостачання багатоквартирних житлових будинків, які б давали можливість врахувати динамічний водорозбір, різні сценарії підігріву теплоакumuлюючого баку, динаміку температур в системі опалення і інтеграцію теплового насоса з індивідуальним тепловим пунктом.

Було розроблено математичну модель, що вирішує поставлені задачі, і дозволяє моделювати роботу теплового насоса на забезпечення тепловою енергією для ГВП і опалення багатоквартирних будівель, з можливістю моделювання погодинної динаміки зміни температури в теплоакumuлюючому баці, урахуванням впливу водорозбору на цей процес, паралельний з цим підігрів зворотного трубопроводу системи опалення при незалежній схемі опалення будівлі.

Також, математична модель обраховує економічні параметри проєкту, з урахуванням заданих вартостей обладнання і тарифів на енергоносії.

Розрахунки, що проводяться з допомогою розробленої математичної моделі дозволяють визначити:

- оптимальну для даного об'єкту потужність встановлюваного теплового насосу і об'єм теплоакumuлюючого баку

- кількість теплової енергії, що може бути зекономленою завдяки роботі теплового насосу, та кількість електричної енергії, що буде затрачуватися тепловим насосом.
- економічні параметри проєкту, і вплив на них змінних факторів (оцінка ризиків).
- вплив термомодернізації будівлі, або внесення змін в температурний графік опалення на окупність проєкту з використанням теплового насосу.

Проведений аналіз дозволив визначити ефективні і вигідні напрямки розвитку використання теплових насосів в системах централізованого теплопостачання, розробити методики аналізу їх окупності, визначити спектр основних даних, на які потрібно звертати увагу при попередній оцінці доцільності впровадження теплових насосів, а також показав, що при ринкових тарифах окупність даних рішень є цілком прийнятною вже сьогодні, навіть при закладанні певного цінового запасу (а ціна буде знижуватися з розповсюдженням таких рішень в Україні).

Використання теплових насосів в системах централізованого опалення і ГВП – економічно обґрунтовано. Дані проєкти достатньо активно впроваджуються в північних європейських країнах, і немає причин, окрім ситуативного утримання фіксованих тарифів на газ і опалення для населення, чому б ці проєкти не були ефективні в Україні.

Теплові насоси можуть впроваджуватися на різних рівнях і в різному масштабі – від невеликих ТН, що інтегруються в ІТП будинку для підігріву гарячої води, до масштабних проєктів з використанням скидної теплоти з водоочисних споруд міста, і інтеграції в міську теплову мережу.

З урахуванням вартості встановленої потужності ТН, оптимально забезпечити високий коефіцієнт використання встановленої потужності на протязі року, отже в системах, де відмовилися від централізованого ГВП, доцільно його відновити. Крім того, з урахуванням особливостей роботи систем теплопостачання і тепломереж, впровадження теплових насосів на рівні будинків та ЦТП дозволяє

забезпечити надійне постачання гарячої води на протязі всього неопалювального сезону – таким чином, забезпечується економічна доцільність, і надійність, і комфорт для населення.

Споживання електричної енергії тепловими насосами – компенсується зменшенням споживання індивідуальними водонагрівачами, крім того, якщо при використанні індивідуальних водонагрівачів має місце додаткове посилення ранкових і вечірніх піків електроспоживання із-за одночасного відкнення підігріву електробойлерів, то електроспоживання теплового насосу близько до рівномірного на протязі доби. Згладжування піку електроспоживання може бути віднесено до вторинних вигод.

Основною запорукою оптимальної економічної доцільності і окупності проектів з впровадження теплових насосів є правильний і точний розрахунок потрібної встановленої потужності і енергобалансів.

Для підвищення ефективності роботи теплових насосів в системах опалення доцільно знижувати температури графіку опалення в будівлях. Чим краще термомодернізована будівля, і чим більше можливості тепловіддачі в системі опалення, тим нижчі температури теплоносія дозволяють ефективно опалювати будівлю. Таким чином, з урахуванням вартості теплових насосів, доцільно одночасно з встановленням теплових насосів модернізувати систему опалення в будівлі. Програма-мінімум, при цьому – заміна старих чавунних радіаторів, на нові сталеві, з розрахунком на зниження температурного графіку таким чином, щоб протягом 80-90% днів опалювального сезону, було достатньо максимальних температур теплоносія – 45-50 °С.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шовкалюк М.М. Розвиток програм стимулювання підвищення енергоефективності будівель в Україні / Шовкалюк М.М., Леконцева О.Е. / Збірник наук. праць V міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS’2018». [Київ, 17-19 квітня 2018 р.], с.116-117.
2. Шовкалюк М.М. Програми фінансування енергоефективних заходів у багатоквартирних будинках: технічні, економічні та організаційні аспекти / М.М.Шовкалюк, О.Е.Леконцева, М.В.Політикін // Збірник праць міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасний стан та перспективи розвитку економіки, обліку та права». [Полтава, ЦФЕНД, 14 травня 2018 р.], с. 7-10.
3. Микита Є.О., Шовкалюк М.М. Зменшення енергетичної залежності України шляхом підвищення ефективності енергоспоживання житлового сектору та механізми фінансування енергозберігаючих проектів / Збірник праць XV Всеукр. наук.-практ.конф. «Міжнародне науково-технічне співробітництво: принципи, механізми, ефективність» - [Київ, КПІ, 14-15 березня 2019 р.], с.26-27.
4. «Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року» [Електронний ресурс] / Дячук О., Чепелєв М., Подолець Р., Трипольська Г. та ін. ; за заг. ред. Огаренко Ю. та Алієвої О.// Пред-во Фонду ім. Г. Бьолля в Україні. – Київ: Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА». – 2017. – 88 с. Режим доступу: [https://energytransition.in.ua/wp-content/uploads/2018/11/Perehid-Ukrainy-na-vidnovlyuvanu-energetuky-do-2050\\_zvit.pdf](https://energytransition.in.ua/wp-content/uploads/2018/11/Perehid-Ukrainy-na-vidnovlyuvanu-energetuky-do-2050_zvit.pdf)
5. Стан і шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні: у двох книгах [Електронний ресурс] / Проєкт «Наукова книга», Національна академія наук України, Інститут газу, Інститут технічної теплофізики. Книга 2, с.67. – 2022.– Режим доступу: [https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/02/Stan\\_ta\\_shlyakhy\\_rozvytku\\_tsentralizovanoho\\_teplopostachannya\\_2.pdf](https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/02/Stan_ta_shlyakhy_rozvytku_tsentralizovanoho_teplopostachannya_2.pdf)

6. Коренков О.В. Перспективи впровадження теплових насосів у житлово-комунальному господарстві України [Електронний ресурс] / Конференція «Тепловые насосы. Энергосбережение. Экология. Эффективность», с.120-124. – 2018. – Режим доступу: [https://heatpumpjournal.com.ua/wp-content/uploads/2018/06/biblioteka\\_konf\\_korenkov.pdf](https://heatpumpjournal.com.ua/wp-content/uploads/2018/06/biblioteka_konf_korenkov.pdf)
7. European Heat Pump Market and Statistics Report 2023 [Електронний ресурс] / European Heat Pump Association (EHPA). – Режим доступу: [https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/06/EHPA\\_market\\_report\\_2023\\_Executive-Summary.pdf](https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/06/EHPA_market_report_2023_Executive-Summary.pdf)
8. Wärmepumpenabsatz 2022: Wachstum von 53 Prozent gegenüber dem Vorjahr [Електронний ресурс] / Der Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. – 2023. – Режим доступу: <https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/waermepumpenabsatz-2022-wachstum-von-53-prozent-gegenueber-dem-vorjahr/>
9. Quarterly report On European gas markets [Електронний ресурс] / European Commission. – 2023. – Режим доступу: <https://energy.ec.europa.eu/system/files/2023-05/Quarterly%20Report%20on%20European%20Gas%20Markets%20report%20Q4%202022.pdf>
10. Heat pumps: Europe's buildings avoid more emissions than ever [Електронний ресурс] / European Heat Pump Association (EHPA). – 2023. – Режим доступу: <https://www.ehpa.org/news-and-resources/press-releases/market-report-2023/>
11. Heating Market Report 2020 [Електронний ресурс] / European Heating Industry (EHI). – 2022. – Режим доступу: [https://ehi.eu/wp-content/uploads/2022/01/Heating\\_Market\\_Report\\_2020.pdf](https://ehi.eu/wp-content/uploads/2022/01/Heating_Market_Report_2020.pdf)
12. Heat Pumps in Europe [Електронний ресурс] / European Heat Pump Association (EHPA). – 2023. – Режим доступу: [https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/06/Heat-Pump-Key-Facts-May-2023\\_compressed.pdf](https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/06/Heat-Pump-Key-Facts-May-2023_compressed.pdf)
13. Delivering the European Green Deal [Електронний ресурс] / European Commission. – 2021. – Режим доступу: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en)

14. Energy Roadmap 2050 [Електронний ресурс] / European Commission. – 2011. – Режим доступу: [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2014-10/roadmap2050\\_ia\\_20120430\\_en\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2014-10/roadmap2050_ia_20120430_en_0.pdf)
15. Lancement du Plan Climat [Електронний ресурс] / Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Nicolas Hulot. – 2017. – Режим доступу: <https://www.ecologie.gouv.fr/lancement-du-plan-climat>
16. Actual Generation per Production Type / Transparency platform. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://transparency.entsoe.eu/>
17. Нікітін Є.Є. Оптимальний розподіл встановленої потужності в системах опалення з базовим і піковим джерелом теплової енергії. Промислова теплотехніка, 2010. Т.32. №3. С.64-72.
18. Басок Б.І. Сфера доцільного використання теплових насосів в умовах економічної ситуації в Україні [Електронний ресурс] / Національна асоціація України по тепловим насосам. – Режим доступу: <https://saee.gov.ua/sites/default/files/basok.pdf>
19. Безродний М.К., Притула Н.О. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання [Електронний ресурс] / «Вісник Вінницького політехнічного інституту», №3. – 2013. – Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1079/1078>
20. Босий М.В., Кузик О.В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://baltijapublishing.lv/om/index.php/bp/catalog/view/217/5889/12305-1>
21. Григорчук Г.В., Григораш Ю.В., Олійник А.П. Оцінка можливості використання теплових насосів різних типів в енергозберігаючих технологіях [Електронний ресурс] / Міжнародний науковий журнал «Грааль науки», №29. С.174-184. – 2023. – Режим доступу: <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/1440>
22. Місюра Т.О. Магістерська дисертація «Підвищення ефективності систем теплопостачання на базі повітряних теплових насосів та додаткових джерел

- енергії» [Електронний ресурс] / Режим доступу: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27739/1/Misyura\\_magistr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/27739/1/Misyura_magistr.pdf)
23. Мандрика В.А. Підвищення еколого-економічної ефективності комунального теплопостачання шляхом використання теплових насосів [Електронний ресурс] / «Механізм регулювання економіки», № 4. С.201-210. – 2017. – Режим доступу: [https://mer.fem.sumdu.edu.ua/content/acticles/issue\\_35/Vladislav\\_A\\_MandrykaIncrease\\_of\\_Ecological\\_and\\_Economic\\_Efficiency\\_of\\_Municipal\\_Heat\\_Supply\\_by\\_Using\\_Heat\\_Pumps.pdf](https://mer.fem.sumdu.edu.ua/content/acticles/issue_35/Vladislav_A_MandrykaIncrease_of_Ecological_and_Economic_Efficiency_of_Municipal_Heat_Supply_by_Using_Heat_Pumps.pdf)
24. Ткачук К.К. Перспективи застосування теплових насосів в Україні [Електронний ресурс] / Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво», №27. С.144-153. – 2015. – Режим доступу: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/12779/1/21\\_tkachuk\\_k\\_the\\_prospect\\_of.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/12779/1/21_tkachuk_k_the_prospect_of.pdf)
25. Долинский А.А., Драганов Б.Х., Морозюк Т.В. Альтернативное теплоснабжение на базе тепловых насосов: критерии оценки [Електронний ресурс] / Пром. теплотехника, т. 29, №6. С.67-71. – 2007. – Режим доступу: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/61305/11-Dolinsky.pdf?sequence=1>
26. Мальцев О.Ф. Кваліфікаційна робота магістра «Екологічно чиста технологія опалювальних систем з використанням теплових насосів» [Електронний ресурс] / Режим доступу: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/90610/1/Malcev\\_mag\\_rob.pdf;jsessionid=FFED7F3BFB7627BD88011CC36BDDF842](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/90610/1/Malcev_mag_rob.pdf;jsessionid=FFED7F3BFB7627BD88011CC36BDDF842)
27. Стойков В. Про використання теплових насосів у розвинених країнах та широкомасштабне впровадження в Україні [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/stojkov-2020.pdf>
28. Дешко В.І., Шовкалюк М.М. Температурно-погодні фактори теплопостачання / Енергозбереження в будівництві та архітектурі. 2011. Вип.2. С.79-87.
29. J.Hirvonen, K.Sirén High Latitude Solar Heating Using Photovoltaic Panels, Air-Source Heat Pumps and Borehole Thermal Energy Storage [Електронний ресурс] / SWC 2017 / SHC 2017 / ISES Conference Proceedings (2017). – Режим доступу:

[https://www.researchgate.net/publication/326114264\\_High\\_Latitude\\_Solar\\_Heating\\_Using\\_Photovoltaic\\_Panels\\_Air-Source\\_Heat\\_Pumps\\_and\\_Borehole\\_Thermal\\_Energy\\_Storage](https://www.researchgate.net/publication/326114264_High_Latitude_Solar_Heating_Using_Photovoltaic_Panels_Air-Source_Heat_Pumps_and_Borehole_Thermal_Energy_Storage)

30. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. – [Чинний від 2023-03-01] – К.: ДП«УкрНДНЦ», 2023. – 156 с.

31. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінбуд України, 2017. 37 с.

32. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. №169. Офіційний вісник України. 2018, №55. С.301.

33. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №260. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>

34. Находов В.Ф., Шовкалюк М.М., Микита Є.О. Аналіз підходів до визначення кількості теплової енергії на потреби гарячого водопостачання під час енергосертифікації будівель. Енергетика: економіка, технології, екологія. №3. 2022. С.7-17.

35. ДБН В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. К.: Мінрегіон України, 2013. 134 с.

36. ДСТУ Б EN 15316-1:2017 Системи теплозабезпечення будівель. Методика розрахунку енергопотреби та енергоефективності системи. Частина 1. Загальні положення (та відображення енергоефективності). – К.: ДП«УкрНДНЦ», 2017. 30 с.

37. Про затвердження Змін до Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №261. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-20>

38. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. К.: Мінрегіон України, 2016. 205 с.
39. Міністерство соціальної політики України, нормативи що встановлено постановою Уряду від 06.08.2014 №409. Режим доступу: <https://www.msp.gov.ua/news/16212.html>
40. Нарахування суми до сплати за опалення, ГВП та ХВП і водовідведення у разі відсутності квартирних лічильників оцінки [Електронний ресурс] / Режим доступу: [https://cks.com.ua/news/yak-formuyutsya-sumi-do-splati-za-opalennya-garyache-vodopostachannya-ta-holodne-vodopostachannya-i-vodovidvedennya\\_480/](https://cks.com.ua/news/yak-formuyutsya-sumi-do-splati-za-opalennya-garyache-vodopostachannya-ta-holodne-vodopostachannya-i-vodovidvedennya_480/)
41. Звіт з енергоаудиту ОСББ «Мотор» м. Київ, вул. Підвисоцького, 3-А Багатоквартирний житловий будинок [Електронний ресурс] / Режим доступу: [https://aea.org.ua/wp-content/uploads/sample-rep/kpgrp-sample-report\(house\).pdf](https://aea.org.ua/wp-content/uploads/sample-rep/kpgrp-sample-report(house).pdf)
42. Помісячне споживання тепла в будинку на вулиці Проф. Підвисоцького, 3-А [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://teplo.org.ua/buildings/vulitsya-pidvisotskogo-profesora-3a>

