

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра відновлюваних джерел енергії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

доц., д-р техн. наук,

Будько В.І. _____

(підпис)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності (спеціалізації) 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії)

на тему: Система опалення приватного будинку на основі теплового насоса і фотоелектростанції

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ЕД-11мн

(шифр групи)

Міхалін Владислав Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник: проф., д-р техн. наук, Головка В. М.

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

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

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

(підпис)

Рецензент _____

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

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ 2023

**Пояснювальна записка
До магістерської дисертації**

На тему: «Система опалення приватного будинку на основі теплового насоса і
фотоелектростанції»

Київ – 2023 рік

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра відновлюваних джерел енергії**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Будько В.І., д-р. техн. наук
«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Міхаліну Владиславу Ігоровичу

1. Тема дисертації «Система опалення приватного будинку на основі теплового насоса і фотоелектростанції», науковий керівник дисертації Головка Володимир Михайлович, проф., д-р. техн. наук, затверджені наказом університету від «20» березня 2023 р. № 1266-с.
2. Термін подання студентом дисертації «22» травня 2023 р.
3. Об'єкт дослідження: алгоритми функціонування систем опалення, до складу яких входять теплові насоси.
4. Вихідні дані: кліматологічні дані багаторічних спостережень за місцем встановлення системи, дані про вартість електроенергії за 2021 рік, технічні параметри встановленого обладнання.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) Провести аналіз літератури за обраною темою. 2) Розробити математичну модель системи опалення на основі теплового насоса в програмному пакеті MATLAB/SIMULINK. 3) Визначити вихідні параметри та провести моделювання роботи системи опалення за різних режимів експлуатації. 4) Виконати порівняльний аналіз отриманих результатів при різних режимах роботи. 5) Провести техніко-економічний розрахунок

встановлення різних конфігурацій системи опалення на основі теплового насосу, фотоелектростанції та акумулятора теплової енергії, провести техніко-економічне порівняння рішень. 7) Розробити заходи з охорони праці під час експлуатації системи опалення.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 1 презентація.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

1) Міхалін В. І., Головка В. М. Система опалення приватного будинку на основі теплового насосу та фотоелектростанції. *Енергетика і автоматика*. 2023. № 2. с. 63-70.

2) Міхалін В. І., Головка В. М. Підвищення ефективності роботи теплового насоса шляхом зміни алгоритму його функціонування. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: XXIV Міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 18–19 трав. 2023 р. с. 496-497.*

8. Дата видачі завдання «01» вересня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літератури за тематикою дослідження	27.02.2022-10.03.2022	Вик.
2	Створення математичної моделі системи опалення на основі теплового насосу	13.03.2022-31.03.2022	Вик.
3	Визначення вихідних параметрів для моделювання роботи системи опалення при різних режимах	03.04.2022-14.04.2022	Вик.

4	Аналіз результатів роботи програми	17.04.2022-21.04.2022	Вик.
6	Охорона праці під час експлуатації фотоелектростанції і теплового насоса та охорона навколишнього середовища	24.04.2022-05.05.2022	Вик.
7	Оформлення пояснювальної записки	08.05.2022-12.05.2022	Вик.

Студент

Міхалін В. І.

Науковий керівник

Головко В. М.

Реферат

Магістерська дисертація включає в себе пояснювальну записку. Пояснювальна записка складається з 85 сторінок формату А4 та містить 4 таблиці, 27 рисунків, 24 джерела використаної літератури та 3 додатки.

У магістерській дисертації розглянуто алгоритми функціонування теплових насосів, які отримують енергію від малої дахової фотоелектростанції та мережі. Визначено характеристики різних алгоритмів функціонування системи.

Актуальність теми: перехід на енергоефективні технології є вагомим внеском для досягнення вуглецевого нейтралітету. Поширеною практикою стала заміна газових котлів на комплексні системи на основі ВДЕ.

Мета магістерської дисертації: визначення енергетичного співвідношення складових частин комплексної системи опалення приватного будинку на основі теплового насоса та фотоелектростанції.

Об'єкт дослідження: процеси перетворення енергії сонячної радіації і теплових потоків довкілля.

Предмет дослідження: режимні параметри складових комплексної системи опалення приватного будинку.

Методи дослідження: математичне моделювання алгоритмів функціонування опалювальних систем за допомогою програмного пакету MATLAB/SIMULINK.

Для реалізації поставленої мети **сформульовані наступні завдання:**

- вдосконалення математичної моделі системи опалення приватного будинку на основі теплового насоса та фотоелектростанції;
- визначення основних параметрів, які впливають на функціонування даної системи опалення, а саме: температури навколишнього середовища; інтенсивності сонячної радіації; потужності фотоелектростанції, величини теплової потужності та коефіцієнта перетворення теплового насоса, теплофізичних параметрів будинку, вартості електричної енергії, алгоритмів функціонування системи опалення;

- аналіз результатів роботи математичної моделі при різних алгоритмах функціонування, а саме: графіків зміни температури в будинку і температури води в баку-акумуляторі, вартості електроенергії для забезпечення опалення та гарячого водопостачання, рівня забезпеченості споживача електроенергією, визначення необхідних параметрів складових системи опалення для забезпечення конкретних параметрів функціонування, таких як ємність баку-акумулятора та потужність ТЕНа.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні імітаційної математичної моделі комплексної системи опалення приватного будинку, яка враховує особливості графіку теплового навантаження споживача, фактори впливу навколишнього середовища та показники вартості електроенергії, що дозволило визначити енергетичні показники складових частин системи опалення.

Публікації за тематикою досліджень: Основний текст роботи відображено в 2 публікаціях:

1) Міхалін В. І., Головка В. М. Система опалення приватного будинку на основі теплового насосу та фотоелектростанції. *Енергетика і автоматика*. 2023. № 2. с. 63-70.

2) Міхалін В. І., Головка В. М. Підвищення ефективності роботи теплового насоса шляхом зміни алгоритму його функціонування. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: XXIV Міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 18–19 трав. 2023 р.* с. 496-497.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Ключові слова: система опалення, тепловий насос; фотоелектростанція; математична модель; відновлювані джерела енергії; MATLAB/SIMULINK.

Abstract

The master's dissertation includes an explanatory note. The explanatory note consists of 85 A4 pages and contains 4 tables, 27 figures, 24 references and 4 appendices.

The master's dissertation considers operating algorithms of heat pump systems that are powered by small roof-based photovoltaic power plants and power grid. The operating parameters of different algorithms were established.

Relevance of the topic: transfer to the energy-efficient technologies is beneficial contribution for the carbon-neutral future. Changing gas boilers on the complex renewable-based heating solution has become the common practice.

The purpose of the master's dissertation: is to model different operational algorithms of the complex heating system that includes roof-based photovoltaic power plant and the heat pump that provide maximum self-sufficiency and minimum operational cost.

Object of research: the process of converting solar energy and environmental heat flows.

Subject of research: operational parameters of the residential heat pump base heating system components.

Research methods: mathematical modelling of the heating systems operational algorithms with the MATLAB/SIMULINK software package.

The following tasks have been formulated to achieve the goal:

- Creating mathematical model of the residential heating system with the heat pump and photovoltaic station;
- Determining of the main parameters that influence on the heating system operating: ambient temperature, solar irradiation, photovoltaic station power output, heat pump thermal power and coefficient of performance, thermal parameters of the house, electricity tariff and operational algorithms of the heating system;
- Analyze the results of mathematical model of different operational algorithms: plots of the house internal temperature and water storage temperature, total cost of electricity for the space heating and domestic water heating, electricity

supply coefficient, determine parameters of the heating system components for providing a particular operational algorithm, such as storage tank volume and electric heater power.

The scientific novelty of the work is in improving the mathematical model of the complex residential heat pump base heating system that includes heat load graph of the consumer, external factors of the environment, and electrical energy tariffs that enabled to establish operational parameters of the components of the heating system.

Publications on research topics:

1) Mikhalin V., Golovko V. Private household heat pump-based heating system with photovoltaic plant. *Energy and automation*. 2023. No. 2. p. 63-70.

2) Mikhalin V., Golovko V. Increasing efficiency of domestic heat pump-based heating system. *Renewable energy and energy efficiency in the XXI century: XXIV International. scientific and practical conference*, Kyiv, May 18–19 2023. p. 496-497.

Relationship with working with scientific programs, plans, topics. The work was carried out at the Department of Renewable Energy Sources of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Keywords: heating system, heat pump; photovoltaic power station; mathematical model; renewable sources of energy; MATLAB/SIMULINK.

Перелік скорочень

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ТЕЦ – теплоелектроцентрально

ЄС – Європейський Союз

ККД – коефіцієнт корисної дії

ГВП – гаряче водопостачання

КПТ – коефіцієнт перетворення теплоти теплового насоса

ЗМІСТ

ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИТУАЦІЇ З ТЕПЛОПОСТАЧАННЯМ В УКРАЇНІ ТА У КРАЇНАХ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ	15
1.1 Особливості теплопостачання в Україні	15
1.2 Теплопостачання в країнах Європейського Союзу	17
1.3 Європейська стратегія реновації теплопостачання	19
1.4 Структура теплопостачання в країнах Європейського Союзу	22
1.5 Перешкоди для швидкого розвитку індустрії теплових насосів.....	25
1.6. Різновиди теплових насосів та їх характеристики.....	28
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ТА ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	35
2.1 Розрахунок енергії сонячного випромінювання	35
2.2 Графік теплового навантаження споживача	38
2.3 Погодинні значення вартості електроенергії	40
2.4 Принципова схема досліджуваного об'єкта.....	41
2.5 Енергетичні характеристики теплового насоса	46
2.6 «Базовий» алгоритм роботи системи опалення	49
2.7 «Реакційний» алгоритм роботи системи опалення.....	50
2.8 «Економічний» алгоритм роботи системи опалення	50
2.9 «Автономний» алгоритм роботи системи опалення	51
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВОГО НАСОСА І ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ	54
3.1 Опис алгоритму роботи програми.....	54
3.2 Аналіз базового та реакційного алгоритмів функціонування системи опалення	61
3.2 Аналіз економічного та автономного алгоритмів функціонування системи опалення	65
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА....	72
4.1 Заходи безпеки під час монтажу та експлуатації теплових насосів	72
4.2 Заходи безпеки під час монтажу та експлуатації фотоелектричних перетворювачів	74
4.3 Охорона навколишнього середовища	76
ВИСНОВКИ.....	80

ВСТУП

Використання відновлюваних джерел енергії в сучасних системах опалення є одним із ключових напрямків енергоефективності та сталого розвитку. Традиційні джерела енергії, такі як нафта, вугілля та природний газ, спричиняють серйозні негативні наслідки для довкілля, такі як забруднення повітря та викиди парникових газів. У цьому контексті використання відновлюваних джерел енергії стає дедалі більш популярним та необхідним.

Серед відновлюваних джерел енергії, які можна використовувати для забезпечення потреб опалення чи гарячого водопостачання (ГВП), найбільш доступними для побутових споживачів є сонячна енергія, а також низькопотенційна теплова енергія навколишнього середовища (повітря, води або ґрунту).

Сонячні колектори використовують сонячне випромінювання для нагрівання теплоносія. Отримана енергія може використовуватись для опалення приміщень або нагрівання води для побутових чи технологічних потреб.

Тепловий потенціал енергії низькотемпературних джерел, таких як повітряні маси та ґрунтові масиви на глибині, нижчій за глибину промерзання для даної широти, може бути підвищений шляхом стискання теплоносія. Саме цей принцип використовується в сучасних теплових насосах і холодильному обладнанні.

Теплові насоси є високоефективними пристроями для опалення та кондиціонування, що використовують відновлювані джерела енергії. Вони використовують принцип термодинаміки, щоб витягти тепло з одного джерела і перенести його до іншого з більш низькою температурою. Це відновлювані джерела енергії, оскільки тепло, що використовується, постійно поповнюється природними процесами.

Найбільшої популярності набули повітряні теплові насоси. Для них низькотемпературним джерелом енергії слугує повітря з навколишнього середовища. Повітряні теплові насоси є найбільш гнучкими у використанні, оскільки не потребують великих капіталовкладень, високої кваліфікації для встановлення і пусконаладки, а також є простими та надійними в експлуатації [1].

Однією з переваг використання теплових насосів є їх висока ефективність. Вони можуть забезпечувати значно більше енергії на виході, оскільки використовують електричну енергію не для генерації, а для переносу теплової енергії від низькотемпературного джерела до високотемпературного шляхом підвищення тиску теплоносія. Зазвичай вони мають коефіцієнт перетворення енергії (КПТ) від 3 до 5, що означає, що на кожен одиницю спожитої електричної енергії вони генерують 3-5 одиниць теплової енергії. Це дозволяє економити енергоносії та знижувати витрати на опалення. Крім того, використання теплових насосів у системах опалення є екологічно чистим рішенням. Вони не продукують шкідливих викидів в атмосферу, оскільки використовують відновлювані джерела енергії. Загалом, використання теплових насосів у сучасних системах опалення дозволяє ефективно використовувати відновлювані джерела енергії, такі як земля, повітря або вода, забезпечуючи економічність, екологічність та сталість опалення будинків та інших приміщень.

Перехід від централізованої системи опалення на використання теплових насосів дозволяє зменшити витрати на опалення та ГВП за рахунок економії електроенергії. Однак досі мало дослідженою залишається проблема визначення найбільш сприятливої стратегії використання теплових насосів у системах опалення. Так, можна було б досягнути ще більшої економії ресурсів якщо встановити найбільш сприятливі умови роботи систем опалення на основі теплових насосів, які б враховували графіки теплового навантаження

споживачів, графіки погодинної вартості електроенергії, а також можливість живлення теплових насосів не лише від мережі, а й від електрогенеруючих установок відновлюваної енергетики. Особливої уваги також заслуговує питання можливості використання акумуляторів теплової енергії для зміщення у часі періодів роботи теплового насоса по відношенню до періодів ранкового та вечірнього максимумів навантаження енергосистеми. У даній роботі пропонується вирішення цієї проблеми.

Метою роботи є визначення енергетичного співвідношення складових частин комплексної системи опалення приватного будинку на основі теплового насоса та фотоелектростанції.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії сонячної радіації і теплових потоків довкілля.

Предметом дослідження виступають режимні параметри складових комплексної системи опалення приватного будинку.

Використаним **методом дослідження** є математичне моделювання алгоритмів функціонування опалювальних систем за допомогою програмного пакету MATLAB/SIMULINK.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИТУАЦІЇ З ТЕПЛОПОСТАЧАННЯМ В УКРАЇНІ ТА У КРАЇНАХ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ

1.1 Особливості теплопостачання в Україні

Теплопостачання є найбільш енерговитратною галуззю в Україні. Виробництво теплової енергії необхідне для підтримання комфортної температури в будівлях, приготування гарячої води для санітарно-гігієнічних потреб, а також для реалізації технологічних процесів на промислових підприємствах.

Житлово-комунальний сектор споживає 44% від усієї виробленої теплової енергії або 70 млн. тон умовного палива, що становить близько 30 % загального споживання палива в Україні. Житловий фонд держави та соціальна сфера споживають 85 % енергоресурсів від загального споживання галуззю. Щорічно галузь споживає електроенергії — близько 10,0 млрд кВт/год., природного газу — близько 14,0 млрд куб.м, вугілля — близько 1,5 млн т. Нетрадиційні та відновлювані види енергії становлять 0,87 млн. тон умовного палива [1].

Промислові підприємства використовують 35% від генерованої в Україні теплоти. Споживання інших економічних галузей становить 21% загальної виробленої теплової енергії в країні.

Основними джерелами теплопостачання для великих міст (населення більше 250 тис. осіб) є теплоелектроцентралі (ТЕЦ) і котельні. Первинним джерелом енергії для них слугує природний газ, вугілля або мазут. У сільській місцевості споживачів забезпечують теплотою невеликі котельні та опалювальні печі. Також для виробництва теплової енергії використовують електричні теплогенератори і установки з утилізації вторинних теплових енергоресурсів і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [2].

На відміну від ТЕЦ і великих котелень централізованого теплопостачання, виробництво теплоти в малих котельнях і опалювальних

печах потребує значних витрат некваліфікованої праці та сприяє більш сильному забрудненню навколишнього середовища у порівнянні з промисловими методами виробництва теплової енергії.

За даними Державної служби статистики, в Україні налічується всього 14 678 тисяч домогосподарств. З них 67,7% проживають у містах і 32,3% у сільській місцевості. Майже 40% домогосподарств мають індивідуальне опалення різного типу: газовий чи твердопаливний котел або електричний бойлер [3].

Таблиця 1.1 – Структура систем опалення в приватних домогосподарствах

	Всі домогосподарства		у тому числі, які проживають					
			у міській місцевості			у сільській місцевості		
			у великих містах	у малих містах	всього			
	2020	2021	2021		2020	2021	2020	2021
Кількість домогосподарств (тисяч)	14784,3	14678,1	5814,2	4129,8	10002,2	9944,0	4782,1	4734,1
Розподіл домогосподарств (%) за наявністю в їх житлі :								
центрального опалення	35,6	36,1	73,1	24,9	52,6	53,1	0,1	0,3
індивідуальної системи опалення	48,0	45,9	24,8	59,5	41,3	39,2	61,8	60,0
гарячого водопостачання	52,6	51,9	77,0	44,2	64,4	63,4	27,9	27,9
котла електричного	1,4	1,4	1,0	1,9	1,4	1,4	1,3	1,4
котла газового двоконтурного	23,9	23,4	16,4	31,3	23,4	22,6	25,0	25,3
котла твердопаливного	8,4	8,8	1,5	9,4	4,2	4,8	17,0	17,2
бойлера електричного	36,8	38,9	39,5	38,7	37,7	39,2	34,9	38,3
газової колонки	10,3	10,7	11,5	14,9	11,9	12,9	7,1	6,0
централізованого газопостачання	80,5	80,1	90,5	86,1	88,1	88,6	64,6	62,2

В Україні на опалення одиниці площі в існуючих будівлях з централізованим теплопостачанням витрачається в 1,5 рази більше енергоресурсів, ніж у США і в 2,5-3 рази більше, ніж у Швеції. Витрати палива на вироблення 1 Гкал тепла в комунальній теплоенергетиці становлять 160–180 кг. умовного палива, тоді як в розвинутих країнах цей показник становить 145–150 кг.

Втрати теплової енергії за рік складають більше 13 млн. Гкал. Це 12 % від обсягів відпущеної теплової енергії, на які марно витрачено 2,5 млрд м³

природного газу. Перевитрата палива призводить до викидів в атмосферу 45 г/МДж СО замість 26 г/МДж СО.

На підприємствах комунальної теплоенергетики налічується понад 29 тисяч котелень, технічний стан яких є критичним. Більш як 23% котлів експлуатуються понад 20 років. Значна кількість котлів (38%) малоефективна – коефіцієнт корисної дії становить 65–75%.

Аналіз втрат теплової енергії і природного газу, що використовується на виробництво втраченої теплової енергії в комунальній теплоенергетиці у схемах централізованого тепlopостачання свідчить про те, що втрати при виробництві (на котельнях) сягають до 22 %, при транспортуванні теплової енергії до 25 %, але найбільші перевитрати природного газу відносяться на виробництво теплової енергії втраченої у споживача до 30 % [1].

1.2 Тепlopостачання в країнах Європейського Союзу

Європейський Союз (ЄС) має власну стратегію розвитку сектору опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Вона спрямована на перехід до використання енергії з ВДЕ для опалення і кондиціонування приватних домогосподарств та промислових підприємств, на які припадає 50% річної спожитої енергії у ЄС. Метою стратегії є зробити сектор «розумнішим» і ефективнішим, за рахунок впровадження систем автоматичного керування технологічними процесами і систем типу «розумний будинок», зменшити імпорт енергоресурсів та загальний рівень залежності від імпорту палива, знизити витрати на опалення та кондиціонування, а також зменшити викиди парникових газів.

Станом на 2015 рік потреби на опалення в країнах Європейського Союзу становлять 50% від їхнього річного споживання енергії. Так, на потреби опалення використовується 15% від усієї спожитої в ЄС нафти та 46% спожитого газу [4].

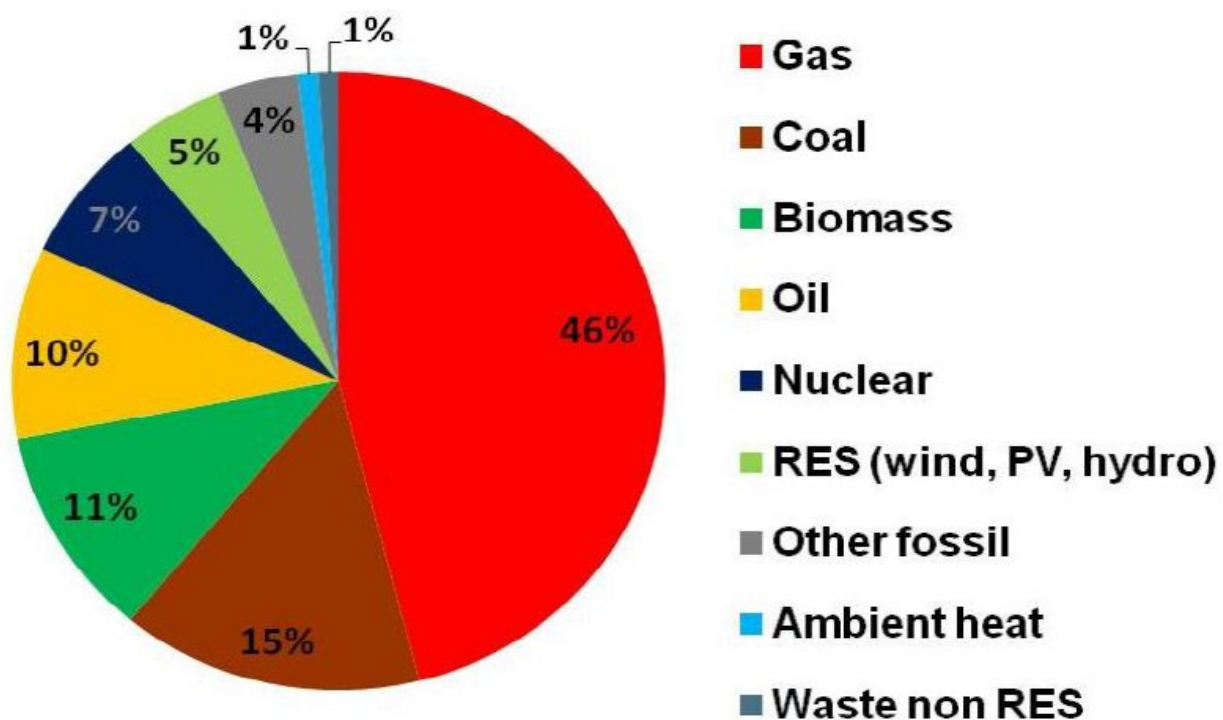


Рисунок 1.1 – Структура первинних джерел енергії для потреб теплопостачання в ЄС станом на 2015 рік [1]

Причини неефективного використання енергоресурсів для опалення:

- велика кількість старих будівель, а також застаріле обладнання ТЕЦ та котелень.

Так, майже половина будівель ЄС мають котли, встановлені раніше 1992 року, з коефіцієнтом корисної дії (ККД) нижче 60%. Також 22% газових котлів, 34% електричних бойлерів, 47% масляних котлів і 58% вугільних котлів, що досі експлуатуються, вже перевищили свій термін служби. Реконструкція існуючих будівель може допомогти знизити споживання енергії, однак темпи реконструкції нині становлять менше 1%.

- низький рівень впровадження відновлюваних джерел енергії в опалювальному секторі.

Природний газ є основним джерелом енергії для опалення та кондиціонування (46%), на другому місці вугілля (близько 15%), біомаса

(близько 11%), мазут (10%), атомна енергія (7%) і деякі відновлювані джерела енергії (вітер, фотоелектричні та гідроелектричні станції – разом близько 5%). Інші відновлювані джерела енергії, такі як сонячна теплова енергія, низькопотенційна теплова енергія навколишнього середовища та геотермальна енергія разом складають 1,5%, а інші види викопного палива – 4%. Загалом установки відновлюваної енергетики забезпечують до 18% енергії для потреб тепlopостачання, тому є великий потенціал для збільшення цієї частки.

- високий рівень теплових втрат при централізованому виробництві теплової енергії.

Значна кількість тепла, виробленого на об'єктах промисловості, втрачається при транспортуванні споживачам. За приблизними оцінками, кількість втраченого в атмосферу або у воду тепла є достатньою для покриття опалювальних потреб країн Євросоюзу [4].

1.3 Європейська стратегія реновації тепlopостачання

У 2016 році Європейською комісією було прийнято план Декарбонізації тепlopостачання, що має ключове значення для кліматичної нейтральності країн ЄС. Він покликаний знизити теплові втрати будівель, підвищити ефективність використання систем опалення та кондиціонування. Досягнення поставлених цілей базується на:

1) Запровадженні заходів із полегшення реконструкції будівель

Суттєвої економії ресурсів на опалення очікується досягти за рахунок використання сучасного обладнання для опалення та кондиціонування (в основному теплових насосів), а також використання більш сучасних теплоізоляційних матеріалів. Також планується розробка заходів з модернізації існуючих багатоквартирних будинків та доповнення до вимог із теплової ізоляції нових будівель.

Програми оптимізації витрат на утримання будинків дозволять орендарям і власникам отримати вигоду від інвестицій у житло, відремонтувати старі будинки, а також замінити застарілі системи опалення на нові, більш ефективні, які використовують відновлювані джерела енергії або опалення, отримане від оновлених мереж централізованого теплопостачання.

Застосування перевірених моделей та найкращих практик енергетичного менеджменту в державних школах і лікарнях дасть додаткову економію коштів, які можна буде в подальшому витратити на забезпечення іншим обладнанням для шкіл та лікарень. Бюрократизація державної сфери позначається також на економічній ефективності експлуатації комунальної нерухомості. Тому необхідна ефективна співпраця з енергосервісними компаніями, впровадження більш ефективних рішень для забезпечення власних потреб будівель, модернізація систем опалення та кондиціонування, а також перехід на відновлювані джерела енергії.

Запровадження системи сертифікатів енергоефективності будівель дасть змогу надавати учасникам ринку нерухомості інформацію про використання відновлюваної енергії в будівлях, а також створити ринкові сигнали для більш широкого використання відновлюваної енергії в будівлях.

2) Збільшення частки ВДЕ

Галузь теплопостачання досі значною мірою залежить від викопного палива. Відновлювані джерела енергії забезпечують лише 18% потреб опалення та кондиціонування. Важливо також розуміти, що енергоефективність і використання відновлюваної енергії доповнюють одне одного. Збільшення частки відновлюваних джерел енергії в будівлях запроваджено на законодавчому рівні у Директиві про відновлювані джерела енергії та енергетичну ефективність будівель [5].

Також планується надання субсидій на впровадження використання технологій ВДЕ в опалювальному секторі через європейські структурні та інвестиційні фонди, програму ЄС «Горизонт 2020» та Інтегрований стратегічний план енергетичних технологій [5].

3) Повторне використання промислових енергетичних відходів

Промислові енергетичні установки виробляють велику кількість відпрацьованого тепла, яке потім розсіюється у навколишнє середовище. Для запобігання тепловим втратам пропонується кілька шляхів:

Пряме підключення споживачів через теплоцентралі. Централізоване теплопостачання споживачів з промислових підприємств вже практикується у шведському місті Гетеборг, де понад 90% усіх житлових будинків опалюються відпрацьованим теплом розташованих поблизу промислових підприємств (нафтопереробних та хімічних заводів), а також за рахунок спалювання відходів та когенерації.

Не зважаючи на те, що опалювання відбувається за рахунок вторинної теплоти, всі ці джерела теплопостачання утворюють разом зі споживачами теплоенергетичну мережу загальною протяжністю близько 1000 км, що є можливим завдяки якісно побудованій системі передачі теплової енергії, яка мінімізує втрати у навколишнє середовище.

4) Зацікавленість споживачів

Власники нерухомості, орендарі та державні структури повинні мати можливість приймати обґрунтовані рішення щодо реконструкції будівель, ефективного використання опалювальних технологій, способів заощадження енергії за допомогою вдосконаленого обліку споживання, контролю за використанням енергії в режимі реального часу та автоматизації. Це допоможе їм зрозуміти як приймати більш економічно доцільні рішення щодо впровадження рішень для опалення та кондиціонування будівель.

1.4 Структура теплопостачання в країнах Європейського Союзу

Теплові насоси визнано найкращою альтернативою для використання в системах домашнього опалення. Цього висновку дотримуються уряди багатьох європейських країн. Так, зокрема уряд Великобританії поставив перед собою ціль вийти на встановлення 600 000 теплових насосів на рік до 2028 року та заборонити продаж нових газових котлів з 2035 року. Подібну ініціативу підтримують також інші європейські країни, такі як Німеччина, Франція, Італія та Польща.

Амбітною ціллю ЄС є переведення 40% домогосподарств на електричне опалення за допомогою теплових насосів до 2030 року [5].

Станом на 2021 рік, в двадцяти семи країнах Європейського союзу налічувалося близько 197 мільйонів приватних домогосподарств. Перші десять країн за кількістю домоволодінь наведені на рисунку 3 [6].

При цьому в ЄС встановлено лише 17 мільйонів теплових насосів (станом на кінець 2021 року). І рейтинг країн-лідерів за кількістю встановлених теплових насосів аж ніяк не корелює із рейтингом країн за кількістю приватних домогосподарств, про що свідчить діаграма.

Скандинавські країни лідирують за кількістю встановлених теплових насосів на 100 тис. населення. Це зумовлено багатьма чинниками, зокрема високим рівнем економічного розвитку, поінформованістю людей щодо необхідності збереження природних ресурсів, а також менталітетом жителів цих країн.

Норвегія є лідером у Європі із 24 675 теплових насосів на 100 тис. населення. Країна, яка володіє чи не найбільшими у світі запасами нафти, впродовж останніх років виділяла субсидії на встановлення теплових насосів. Значною мірою джерелом цих коштів є доходи від експорту нафти. Прагнення заохочувати встановлення теплових насосів було настільки успішним, що у

2020 році Норвегія змогла повністю заборонити газове опалення. Це яскравий приклад правильної мотивації для переходу на енергоощадні технології.

А оскільки Норвегія виробляє майже 100% електроенергії з відновлюваних джерел, в основному завдяки своїм гідроелектростанціям, можна вважати, що 1,33 мільйони теплових насосів у цій країні є на 100% відновлюваним опаленням.

Швеція має результат у 19 510 теплових насосів на 100 тис. населення. Теплові насоси встановлюють у всіх нових будинках у Швеції. Це допомогло майже повністю витіснити з ринку опалення на викопному паливі. Станом на 2021 рік, газові котли опалюють менше 10% домогосподарств у Швеції.

Також більше половини електроенергії в Швеції постачається з відновлюваних джерел, як-от гідроенергії, енергії вітру та біопалива, які безпосередньо використовуються для живлення двох мільйонів теплових насосів країни.

Серед країн центральної Європи Франція має найбільшу густину встановлення теплових насосів, яка становить 4586 на 100 тис. населення. Такий показник зумовлений значно більшою кількістю населення, порівняно зі скандинавськими країнами. Загалом у Франції 8,7 мільйона теплових насосів, тому вона не має рівних у Європі і лише прискорюється в цій галузі. За останні два роки вона збільшила загальну кількість теплових насосів на 34% — це найбільше серед усіх європейських країн.

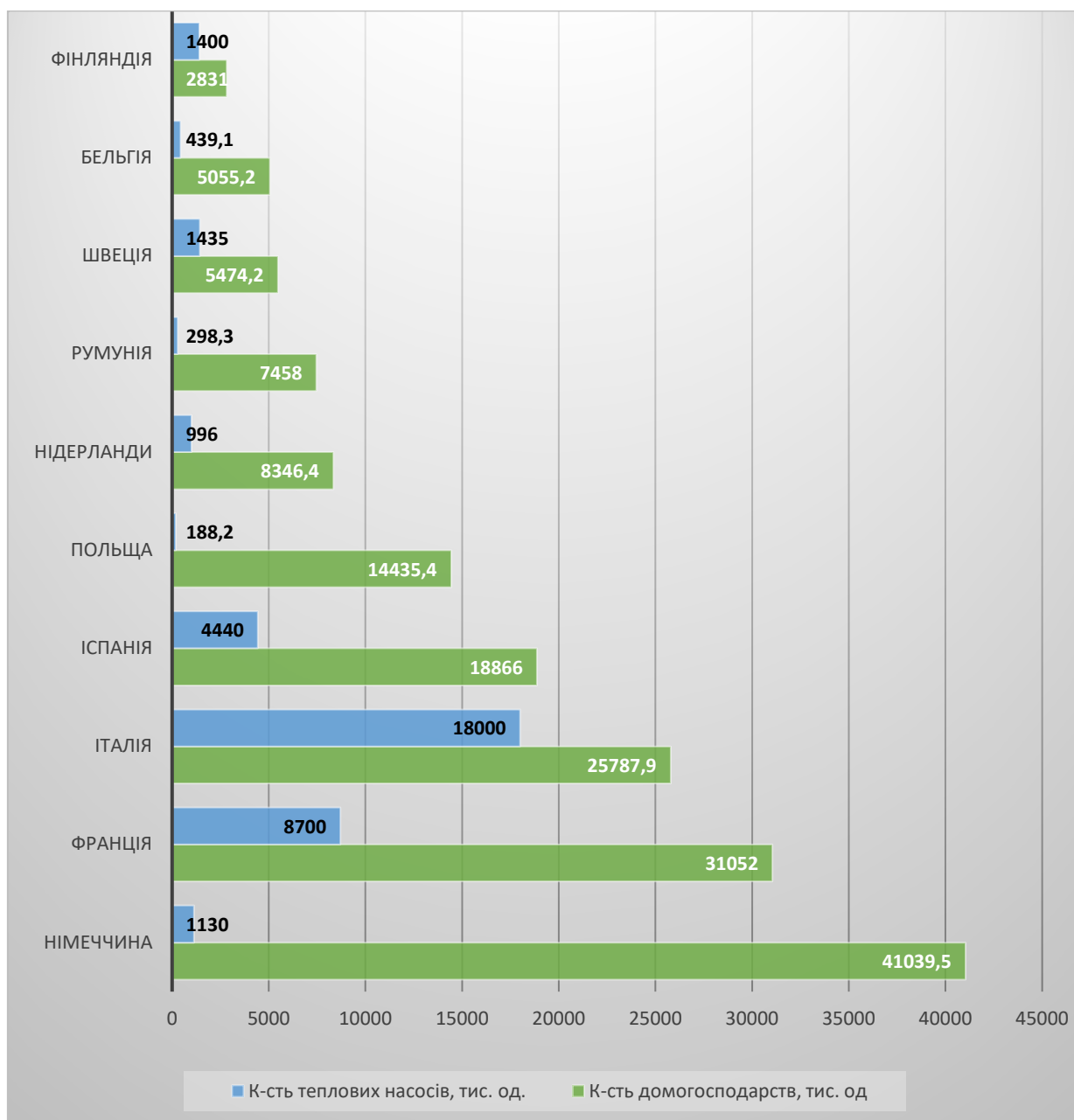


Рисунок 1.2 – Кількість приватних домогосподарств та встановлених теплових насосів у ТОП-10 країнах ЄС за кількістю населення станом на 2021 рік

Перехід на електричне опалення був частково спричинений екологічними будівельними нормами 2012 року, які стимулюють перехід нових будівель на теплові насоси. У Франції галузь виробництва, встановлення та обслуговування теплових насосів забезпечує 20 000 робочих місць і заощадила 12,3 мільйона тон парникових газів у 2020 році [5].

1.5 Перешкоди для швидкого розвитку індустрії теплових насосів

Захмарно високі ціни на газ спричинили різке підвищення попиту на теплові насоси по всій Європі, виявивши низку перешкод, які обмежують можливості промисловості надавати послуги зі встановлення теплових насосів. Серед них найбільш вагомими брак кваліфікованих працівників та необхідність утеплення будівель для забезпечення максимальної ефективності систем опалення.

Амбіції країн ЄС в розрізі темпів розвитку індустрії теплових насосів надзвичайно амбітні, адже у всій Європі встановлено сумарно лише 17 мільйонів теплових насосів порівняно з наявними 20 мільйонами газових котлів лише у Німеччині. Уряди країн ЄС планують запровадити стратегію скорочення видобутку газу, а також припинити встановлення нових систем газового опалення в будинках.

На практиці це означає встановлення теплових насосів замість газових котлів. Наприкінці 2022 року Уряд Німеччини прийняв рішення, що будь-яка нова система опалення, встановлена після 1 січня 2025 року, повинна працювати на відновлюваних джерелах енергії. Промисловість зрозуміла цю постанову як неявний мандат для теплових насосів.

Німеччина не єдина, хто вдвічі скорочує сектор газового опалення, Франція також спрямовує субсидії на підтримку встановлення нових теплових насосів. У США адміністрація президента навіть розглядала промислові потужності часів другої світової війни для масового виробництва теплових насосів і доставки їх через Атлантику для допомоги європейцям у відмові від газової залежності.

Європейська комісія також має власну стратегію реструктуризації опалювального сектору. Завдяки своїй ініціативі REPowerEU виконавча влада ЄС хоче встановити 30 мільйонів нових теплових насосів до 2030 року, що в перспективі може заощадити 35 мільярдів кубометрів газу в ЄС на рік. Для

багатьох із цих програм натхнення прийшло з Британії, яка має ціль встановити 600 тис. теплових насосів на рік до 2028 року.

Але за словами генерального секретаря Європейської асоціації теплових насосів (European Heat Pump Association) наразі попит на теплові насоси настільки високий, що інсталятори мають проблеми зі встановленням пристроїв. Ось чотири основні перешкоди, які він назвав:

1. Відсутність кваліфікованих робітників

Проблемою є не лише виробничі потужності, але й брак кваліфікованих працівників. Але промисловість впевнена, що зможе впоратися зі зростаючим попитом. Хоча працівники зараз перевантажені, гнучкість виробників та інсталяторів принесе на ринок нові технології та бізнес-моделі, щоб мати можливість задовольняти зростаючий попит.

Скептики швидко вказують на перешкоди, які перешкоджають масовому переходу на теплові насоси, акцентуючи увагу на тому, що теплові насоси малоефективні у для будинків з низьким рівнем теплової ізоляції. Але не дивлячись на низький рівень теплоізоляційних властивостей будівлі, інсталятори все одно проводять технічну інспекцію будівлі. А далі пропонують замовникам кошторис на встановлення систем опалення. Якщо ціна прийнятна для замовника, можна починати монтаж. Адже система опалення з тепловим насосом все одно більш економна у порівнянні з газовим котлом.

Коли справа доходить до встановлення нової системи опалення, підвищення кваліфікації працівників може бути швидким. Звичайний монтажник опалення вже має кваліфікацію для встановлення теплового насоса. Усі додаткові знання для монтажу теплового насоса можна отримати за тиждень. Європейська асоціація теплових насосів також організовує спеціалізовані п'ятиденні навчальні курси, під час яких вони дають

працівникам чотири дні теорії та один день практики, після чого вони готові до встановлення теплових насосів [7].

2. Стабільність енергосистеми

Іншою перешкодою на шляху масового переходу на теплові насоси є здатність електричних мереж обслуговувати мільйони нових систем електричного опалення.

Проте енергетичні підприємства впевнені, що електрична мережа зможе підтримувати функціонування ще близько 50 мільйонів теплових насосів. І масштабне розгортання електричних теплових насосів не поставить під загрозу безпеку постачання електроенергії ні зараз, ні в найближчому майбутньому [7].

3. Стан теплової ізоляції будівель

Покращення ізоляції будівель розглядається як передумова для масового впровадження теплових насосів і запобігання перевантаженню мережі.

Що стосується найближчої перспективи, то за думкою експертів галузі, теплові насоси в першу чергу необхідно встановлювати у будівлях з високим рівнем теплової ізоляції. Це дасть змогу споживати електроенергію максимально ефективно і не допустить перевантаження електричної мережі в періоди максимального споживання. У більш довготривалій перспективі уряди країн ЄС розглядають підвищення стандартів теплової ізоляції будівель, адже це є передумовою значної економії енергоресурсів у майбутньому. Однак необхідно зазначити, що позитивні зрушення у цьому напрямку можна очікувати лише через кілька років після їх запровадження, адже девелоперам знадобиться певний час для адаптації до нових умов [7].

4. Проблема фреонів

Теплові насоси наразі використовують сімейство холодоагентів, які називають фреонами. Вони були розроблені в 1990-х роках для заміни

хлорфторовуглеводнів та гідро-хлорфторовуглеводнів, які руйнували озоновий шар, але в подальшому стали об'єктом критики через їх високий потенціал глобального потепління.

Подібно до CO_2 , фреони сприяють глобальному потеплінню і є дуже хімічно стійкими сполуками, що означає, що вони залишатимуться в атмосфері протягом тривалого часу.

Для вирішення цієї проблеми ЄС вирішила знизити виробництво фреонів у 2015 році, накладаючи щорічні квоти на виробників, щоб стимулювати використання альтернатив. Однак, обмеження застосування холодоагентів може значно сповільнити перехід на теплові насоси [7].

1.6. Різновиди теплових насосів та їх характеристики

Тепловий насос – це енергоефективна технологія опалення і кондиціонування, яка забезпечує перенесення тепла з одного місця в інше, використовуючи для цього порівняно кількість електроенергії. Спосіб роботи теплового насоса базується на зворотному циклі Карно.

Тепловий насос працює за принципом термодинамічного циклу, в якому з використанням компресора і теплообмінника тепло переноситься від низькотемпературного джерела теплоти до високотемпературного. Залежно від типу теплового насоса, низькотемпературним середовищем може бути повітря, ґрунт або вода, а високотемпературним – повітря або вода, яку можна використовувати для опалення приміщень або для гарячого водопостачання.

Стиснутий холодоагент крізь капіляр у випарник, де завдяки зниженому тиску відбувається його випаровування. Під час цього холодоагент накопичує тепло від внутрішніх стінок випарника. Випарник у свою чергу відбирає тепло в повітря, ґрунту або води, розташованих навколо нього. Далі холодоагент стискається компресором і його температура підвищується. Після цього він потрапляє у конденсатор, переходячи у рідкий стан з виділенням тепла, яке віддає опалювальному контуру. Процес повторюється постійно. Коли температура в приміщенні піднімається до встановленого рівня, терморегулятор вимикає компресор і тепловий насос перестає працювати. Коли температура в опалювальному контурі падає, терморегулятор знову запускає компресор. У такий спосіб холодоагент і тепловий насос здійснює зворотний цикл Карно.

Теплові насоси здатні не тільки опалювати приміщення, але й забезпечувати гаряче водопостачання, а також здійснювати кондиціювання повітря. Але при цьому в теплових насосах повинен бути реверсивний клапан, саме він дозволяє тепловому насосу працювати у зворотному режимі.

Теплові насоси можна класифікувати за кількома параметрами, такими як джерело тепла, різновид теплоносія, тип компресора та сфера застосування.

За джерелом тепла:

- насоси типу повітря-повітря;
- насоси типу повітря-вода;
- насоси типу ґрунт-вода;
- насоси типу вода-вода;

Теплові насоси «повітря-повітря» – це найбільш популярний тип насосів, оскільки вони мають ряд переваг, у порівнянні з іншими тепловими насосами. Ціна на таке обладнання значно нижча ніж для інших типів. Вони не потребують земляних робіт чи укладки теплообмінника на дні водойми. Також,

не має потреби встановлювати радіатори опалення. Достатньо, щоб були повітропроводи або встановлений внутрішній блок у приміщенні. За рахунок цього скорочується вартість монтажних робіт. Також практично всі теплові насоси «повітря-повітря» є універсальними, тобто, у холодну пору року вони працюють на опалення, а літом на охолодження.

І все ж у теплового насоса типу «повітря-повітря» є певні недоліки. Ефективність його роботи дуже сильно залежить від кліматичних умов. Коли температура повітря на вулиці опускається до -10°C і нижче, значно зменшується коефіцієнт перетворення енергії, що призводить до збільшення витрат на електроенергію. Також потоки повітря, нагріваючи приміщення, спричиняють рух частинок пилу. Це може викликати алергічну реакцію людини.

Більш поширеними у використанні для повноцінних систем опалення є теплові насоси, в яких теплоносієм вторинного контуру є вода. Серед них повітряні, геотермальні та водяні. Такі системи є дуже гнучкими, оскільки можуть працювати паралельно з опалювальними агрегатами інших типів, використовуючи спільно з ними внутрішній контур радіаторів опалення будівлі.

Геотермальні теплові насоси використовують ґрунт в якості низькотемпературного джерела енергії. Земля в геотермальних системах є радіатором в літній період або джерелом тепла в зимовий період. Геотермальні теплові насоси використовують явище теплової інерції: температура землі нижче 3 метрів приблизно дорівнює середньорічній температурі повітря в даній місцевості і слабо змінюється протягом року.

Також теплові насоси розрізняють за сферою застосування:

- для опалення житлових будинків;
- для охолодження та кондиціонування повітря;

- для виробничих потреб;

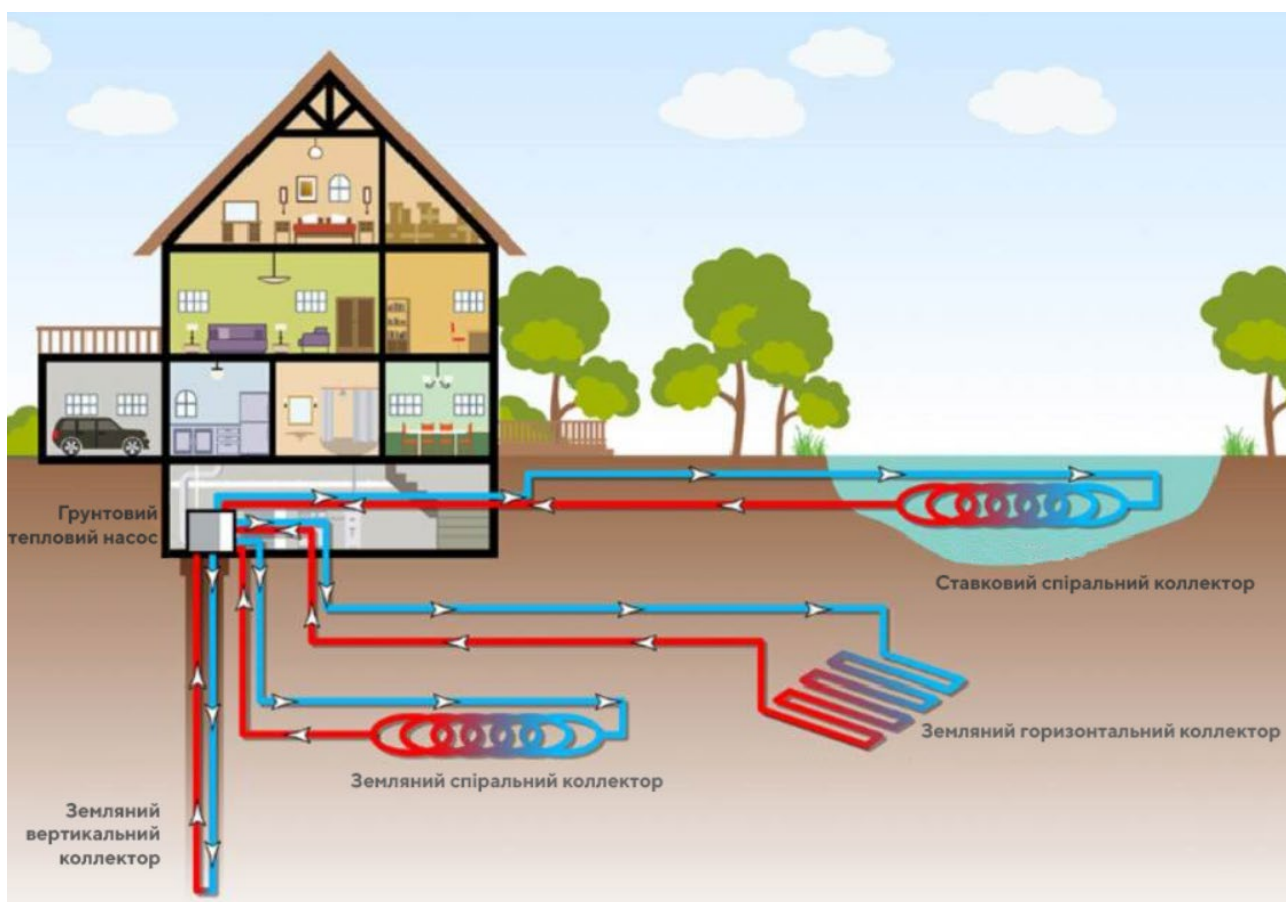


Рисунок 1.4 – Схеми укладання ґрунтових та водяних контурів теплового насоса

Серед переваг теплових насосів у порівнянні з іншими системами опалення:

- Економічність

Тепловий насос використовує електричну енергію значно ефективніше, ніж електричні водонагрівачі. Коефіцієнт корисної дії теплових насосів більший за одиницю. Між собою теплові насоси порівнюють за коефіцієнтом перетворення тепла (КПТ). Він показує відношення одержуваного тепла до витраченої енергії. Приміром, $\text{КПТ} = 4,5$ означає, що номінальна (споживана) потужність теплового насоса становить 1 кВт, а на виході ми одержимо 4,5 кВт теплової потужності, тобто 3,5 кВт тепла ми отримаємо з низькотемпературного джерела енергії (сонячна, геотермальна).

- Широкий спектр застосування

Земля, повітря та вода містять в собі теплову енергію, отриману від сонця. Теплові насоси використовують це тепло. Усе що потрібно для цього — електрична енергія. Деякі моделі теплових насосів можуть застосовувати паливо для своєї роботи.

- Екологічність

Тепловий насос не тільки заощаджує гроші, але й береже здоров'я власникам будинку. Прилад не спалює паливо, не утворюються шкідливі продукти згоряння типу CO, CO₂, NO_x, SO₂. Тому навколо будинку на ґрунті немає слідів сірчаної, азотистої, фосфорної кислот і бензольних з'єднань. Для нашої планети застосування теплових насосів корисне. Адже на ТЕЦ скорочується витрата газу або вугілля на виробництво електрики. Застосовувані у теплових насосах фреони не містять хлорвуглецю і є озонобезпечними.

- Універсальність

Теплові насоси, обладнані реверсним клапаном, працюють як на опалення, так і на охолодження. Тепловий насос може відбирати тепло з повітря будинку, прохолоджуючи його. Влітку надлишкове тепло можна використати для підігріву побутової води або для басейну.

- Безпека

Сучасні теплові насоси пожежобезпечні. В процесі нагрівання води та опалення відсутні небезпечні гази, відкритий вогонь або шкідливі суміші. Деталі теплового насоса не нагріваються до високих температур, здатних стати причиною пожеж. Також виключається можливість замерзання рідин у компресорі або інших складових частинах.

Висновки до розділу 1

1. Проаналізовано сучасний стан галузі теплопостачання в Україні та в країнах Європейського Союзу, а також основні тенденції розвитку теплопостачання житлово-комунального сектору в європейських країнах.

- станом на 2015 р. 50% від усієї виробленої енергії в країнах ЄС використовувалося у теплоенергетиці. 45% від виробленої теплової енергії витрачалося на опалення житлово-комунального сектору, 11 % – на теплові потреби промисловості, 37% – іншими галузями.

- у 2020 році в Україні житлово-комунальний сектор споживав 44% від усієї виробленої теплової енергії, промислові підприємства – 35% інші галузей – 21%.

2. Визначено основні причини високої частки використання первинних джерел енергії на забезпечення потреб теплопостачання житлово-комунального сектору. Це зумовлено:

- станом будівель. Більшість будівель побудовано із дотриманням застарілих стандартів теплоізоляції. При цьому середні темпи модернізації житлово-комунального фонду країн ЄС становлять менше 1% на рік. В Україні цей показник до початку повномасштабного вторгнення Росії становив менше 1%. Проте є причини вважати, що післявоєнна відбудова країни змінить ситуацію на краще.

- застарілим теплогенеруючим обладнанням та інфраструктурою. В ЄС майже половина теплогенеруючого обладнання перевищила свій тридцятирічний термін експлуатації. В Україні більш як 23% котлів експлуатуються понад 20 років. Також 38% котлів має ККД на рівні 65–75%.

- низьким рівнем впровадження енергоустановок на основі відновлюваних джерел енергії, який в середньому по Європі становить 18%, однак є дуже нерівномірним із значно більшою часткою у скандинавських країнах.

- Встановлено, що проблема модернізації теплопостачання є комплексною. Для ефективного її вирішення необхідно забезпечити належний рівень теплової ізоляції будівель. За цієї умови вдасться значною мірою зменшити рівень енергоспоживання галузі та зробити її більш вуглецево-нейтральною.

3. За аналізом нормативних актів, виданих Європейською комісією, теплові насоси визнано найкращим варіантом для модернізації систем теплопостачання. Також уряди багатьох країн ЄС запроваджують заборону на встановлення газових котлів у нових будівлях.

4. Визначено структуру систем опалення житлово-комунального сектору країн Європейського Союзу, згідно з якою станом на 2021 р. в двадцяти семи країнах Європейського союзу налічувалося близько 197 мільйонів приватних домогосподарств, з яких 8% мають опалення на основі теплових насосів. В Україні – 14,6 мільйонів домогосподарств із менш ніж 1% теплових насосів. Відповідно, потенціал розвитку галузі надзвичайно високий.

5. На тлі відмови Європи від російських енергоносіїв і разом з тим підвищення цін на електроенергію, ринок теплових насосів стрімко зростає. А отже постає необхідність впровадження більш ефективних систем керування системами опалювання.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ТА ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

2.1 Розрахунок енергії сонячного випромінювання

Енергетичні параметри системи опалення на основі теплового насоса та фотоелектростанції значною мірою залежатимуть від кліматичних умов місця встановлення. Від інтенсивності енергії сонячного випромінювання для даної широти буде залежати потужність генерації фотоелектростанції. А від температури повітря навколишнього середовища – вихідна теплова потужність та коефіцієнт перетворення теплового насоса. Розглянемо вплив енергії сонячного випромінювання на роботу системи.

Фотоелектростанція для часткового забезпечення електроенергією системи опалення, змонтована на даху приватного будинку у передмісті Києва, географічні координати якого становлять $50^{\circ}24'$ північної широти та $30^{\circ}27'$ східної довготи. Поверхня даху нахилена під кутом 30° до площини горизонту і спрямована на південь, тобто має азимут 0° .

Для обчислення інтенсивності сонячного випромінювання на похилу поверхню, було використано алгоритм розрахунку та формули з [9]. Дані про середню за місяць інтенсивність сонячної радіації і температури навколишнього середовища на нормальну до променів поверхню взято з [10].

Для проведення моделювання визначено чотири дні року, по одному з кожного сезону, які будуть характеризувати увесь сезон. Ці дні – 15 січня, 15 квітня, 15 липня та 15 жовтня. Тривалість періоду моделювання роботи системи опалення становить 24 години, яким відповідає 24-секундний інтервал виконання програми у середовищі SIMULINK. Для кожного з чотирьох днів побудовано графіки інтенсивності енергії сонячного випромінювання на поверхню фотомодулів (рисунок 3.1).

Також побудовано графік середньодобової температури повітря для кожного сезону. В даному випадку – для січня, квітня, липня та жовтня за даними з [10].

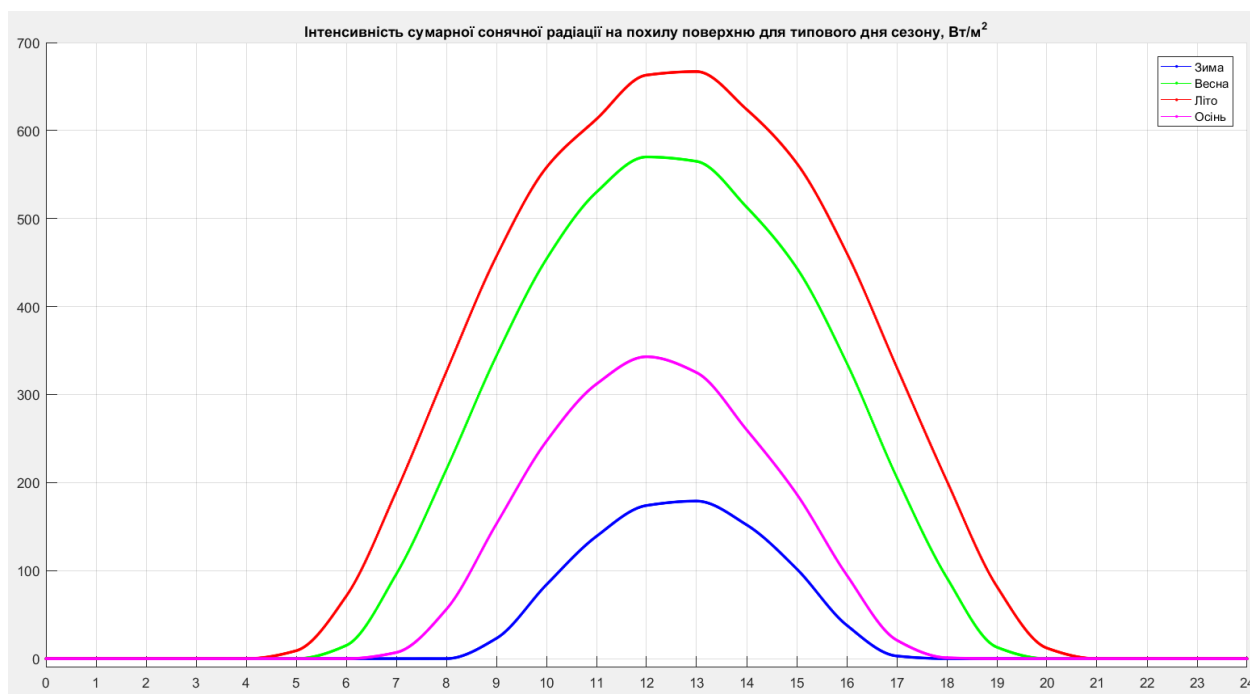


Рисунок 2.1 Потужність сонячної радіації на похилу поверхню протягом доби

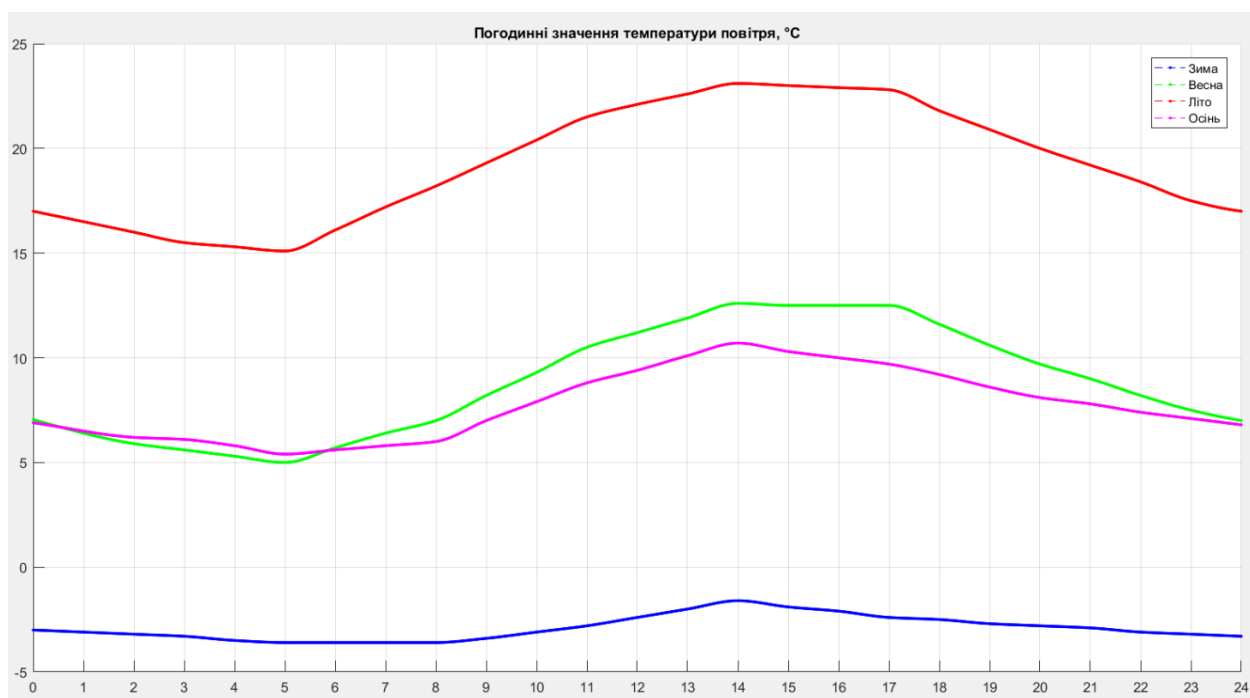


Рисунок 2.2 Середні добові значення температури навколишнього середовища для обраних днів року

Енергетичні характеристики сонячної фотоелектричної установки базуються на технічних характеристиках монокристалічного модуля, зазначених у його технічному паспорті [11]. Загальна площа фотоелектростанції з 14 модулів складає 28 м². Максимальна потужність масиву становить 5740 Вт.

Обрано модель інвертора AXIOMA Energy ISMPPT BFP 8000 з номінальною потужністю 8 кВт. Потужність інвертора більш ніж на 20% перевищує потужність фотомодулів, оскільки не вдалося підібрати інвертор з номінальною потужністю 7 кВт. Більш потужний інвертор дає змогу збільшити потужність фотоелектростанції до 6500 Вт. Характеристики інвертора наведено в таблиці 3.2 [12].

Знаючи електричні характеристики фотомодулів та інвертора, інтенсивність енергії сонячного випромінювання і температуру навколишнього середовища, можемо обчислити значення енергії, яку генерує фотоелектростанція. Ця величина характеризує, скільки енергії доступно тепловому насосу для нагрівання забезпечення опалення будівлі та гарячого водопостачання протягом доби. При обчисленні враховано температурний коефіцієнт потужності фотомодулів [13]:

$$W_{PV} = n_{pan} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{nom} \cdot \left(1 + \gamma \cdot (T_{pan} - 298,15)\right) \cdot I_{gt} \cdot A_{pan} \quad (2.1)$$

де:

W_{PV} – потужність фотоелектростанції, Вт;

n_{pan} – кількість фотомодулів, шт;

η_{inv} – ККД інвертора;

η_{nom} – ККД фотомодуля;

γ – температурний коефіцієнт потужності фотомодуля;

T_{pan} – температура поверхні фотомодуля, яку приймаємо рівною температурі навколишнього середовища °C;

I_{gt} – інтенсивність сонячної радіації на поверхню фотомодулів, Вт/м²;

A_{pan} – площа фотомодуля, м².

Результат розрахунку програмою вихідної потужності фотоелектростанції протягом доби подано на рисунку 3.3.

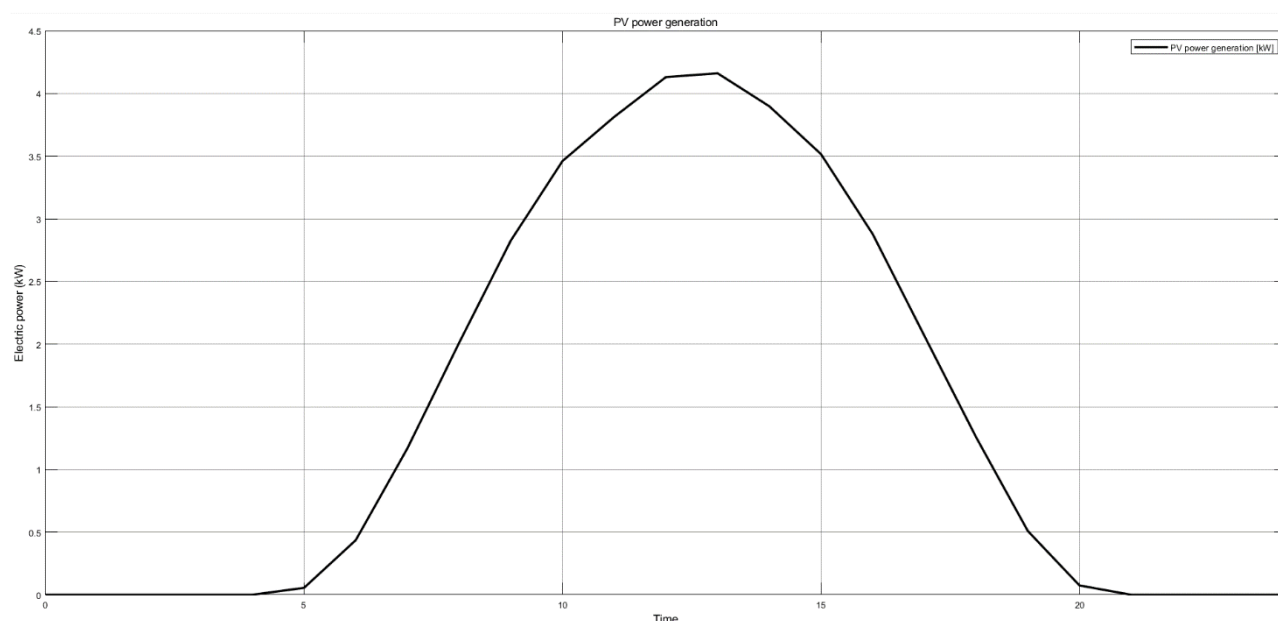


Рисунок 2.3 – Середня протягом літнього сезону потужність генерації фотоелектростанції

2.2 Графік теплового навантаження споживача

Для генерації графіку теплового навантаження ГВП споживача, було використано програмне забезпечення DHWCalc, розроблене співробітниками університету Касселя (Німеччина) [14]. Дане програмне забезпечення має інтерфейс користувача, зручний для вводу характеристик функції розподілу випадкової величини питомої витрати води.

Дана функція обчислюється за попередньо визначеним розподілом ймовірностей на основі функцій Гауса та ступінчастих функцій, як показано на рисунку 3.4. Визначено чотири категорії навантажень. Для двох категорій

(малі та середні питомі витрати води) передбачається постійна ймовірність виникнення у денний та нічний час відповідно. Для двох інших категорій (душ і прийом ванної) задано функцію Гауса з піками вранці та ввечері, відповідно. Кожен з чотирьох профілів витрат води генерується окремо у вигляді масиву чисел і додається наприкінці. Приклад визначеного навантаження ГВП для кожного з досліджуваних періодів подано на рисунку 3.5.

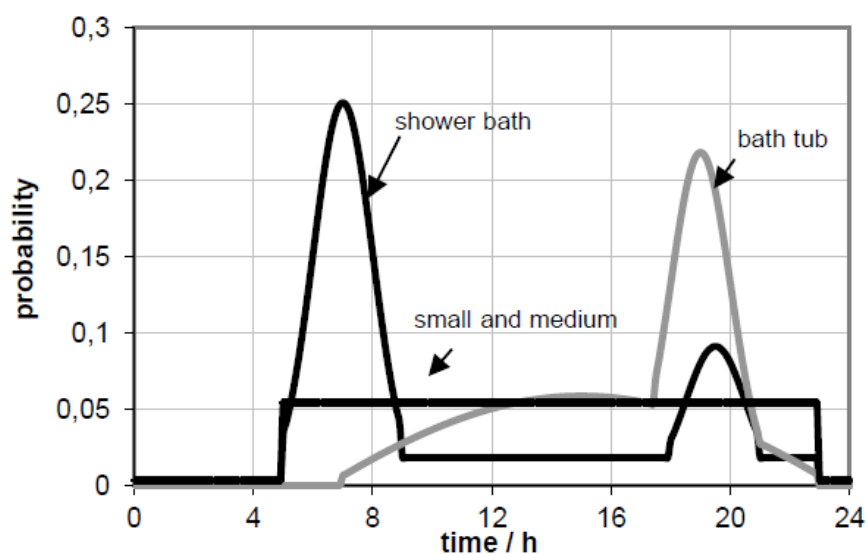


Рисунок 2.4 – Графіки ймовірнісного розподілу трьох різних за інтенсивністю питомих витрат води (1 – малих і середніх, 2 – прийом душу, 3 – прийом ванної) [14]

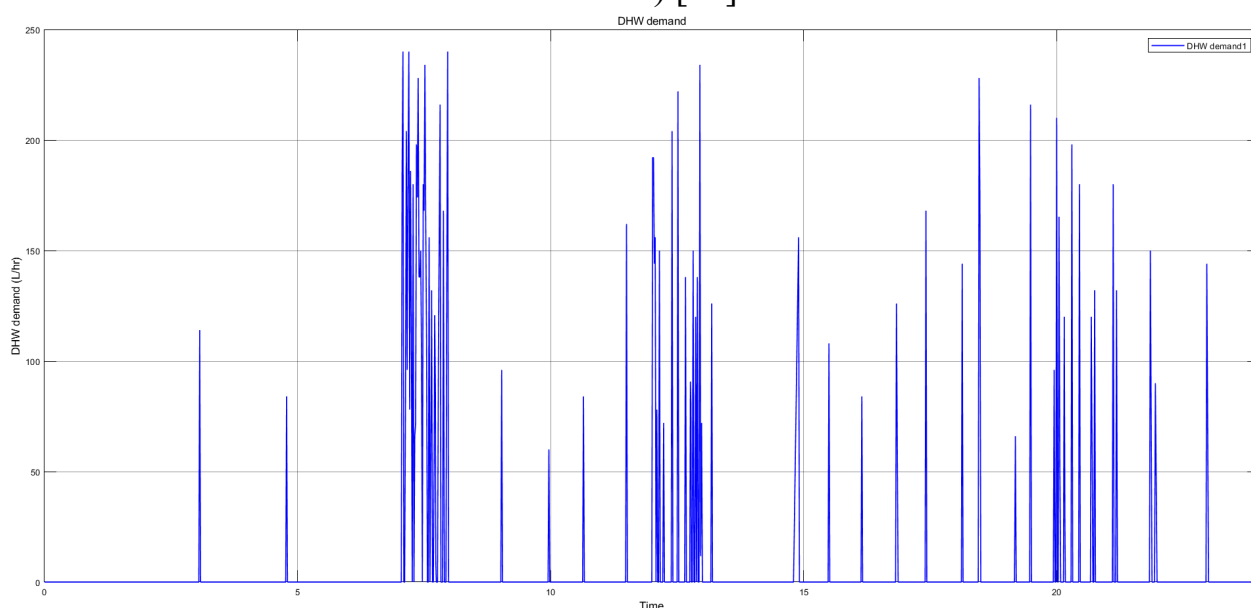


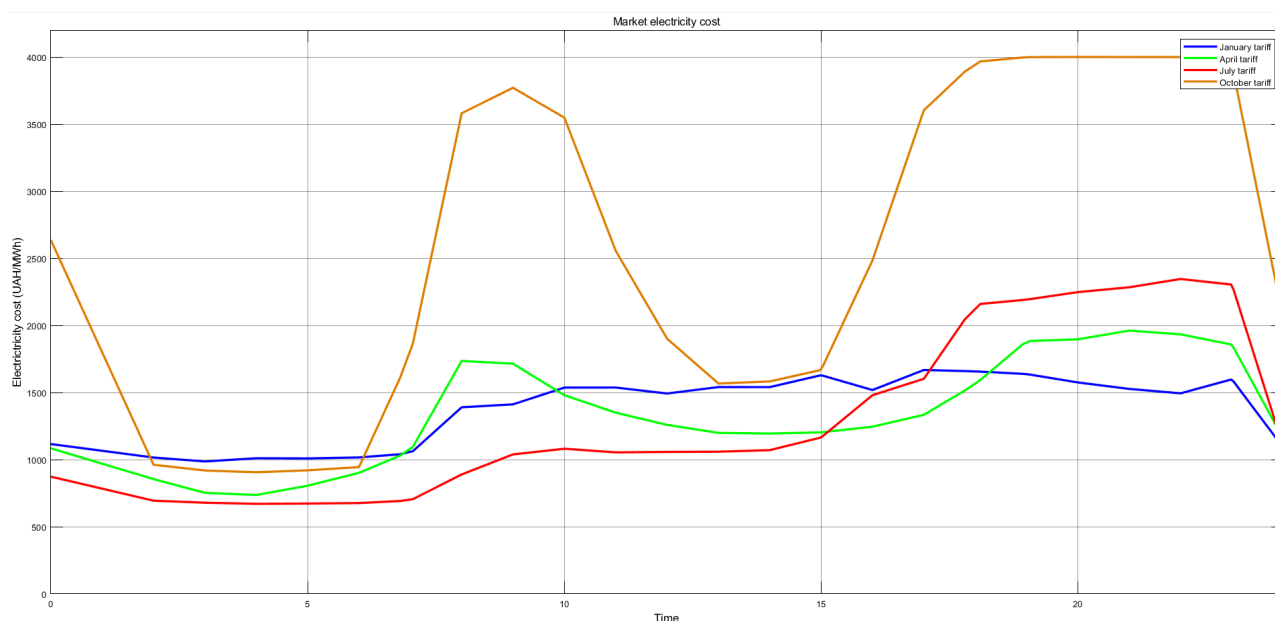
Рисунок. 2.5 – Добовий графік теплового навантаження ГВП

2.3 Погодинні значення вартості електроенергії

Досліджувана система теплопостачання приватного будинку живиться за рахунок енергії фотогенерації лише частково. Основним джерелом електроенергії для теплового насоса і ТЕНа в періоди нестачі потужності від фотоелектростанції є електрична енергія з мережі. Ця електроенергія живить тепловий насос або ТЕН – в залежності від того, може тепловий насос працювати за поточної температури навколишнього середовища. Вартість електроенергії з мережі впливає на експлуатаційні витрати системи опалення.

Дані про погодинну вартість електричної енергії отримано із електронного архіву даних державного підприємства «Енергоринок» за січень, квітень, липень та жовтень 2021 року. На рисунку 3.6 наведено графік середньої протягом місяця ціни за 1 кВт · год. електроенергії на кожну годину доби за даними внутрішньодобового ринку [15].

Як видно з графіків, в пікові години споживання, вартість електроенергії може значно перевищувати середньодобову вартість електроенергії. Тож для різних сценаріїв електроспоживання вартість опалення може суттєво



різнитися.

Рисунок 2.6 – Середньомісячна вартість електроенергії на ВДР

2.4 Принципова схема досліджуваного об'єкта

В даній роботі буде розглядатися система опалення приватного домогосподарства, розташованого у місті Київ, яка складається з:

1. компресійного теплового насоса типу «повітря-вода»;
2. бака-акумулятора теплової енергії із вбудованим теплообмінником (для циркуляції теплоносія із вторинного контуру теплового насоса), а також електричним нагрівальним елементом;
3. радіаторів для опалення внутрішнього простору будинку, по яких циркулюватиме теплоносій із вторинного контуру теплового насоса);
4. системи труб для підведення теплоносія до радіаторів;
5. триходового крана для перемикання подачі теплоносія між акумулятором теплової енергії та радіаторами;
6. фотоелектричної станції перетворювачів для часткового забезпечення теплового насосу електричною енергією;
7. гібридного сонячного інвертора;

Блок-схему системи опалення приватного будинку наведено на рисунку 3.7. Елементи схеми: 1 – дахова фотоелектростанція; 2 – гібридний сонячний інвертор; 3 – вхідна змінна напруга; 4 – блок зовнішнього теплообмінника теплового насоса; 5 – циркуляційний насос; 6 – триходовий клапан; 7 – радіатор опалення; 8 – теплообмінник вторинного контуру теплового насоса; 9 – ТЕН, вбудований в бак-акумулятор; 10 – бак-акумулятор теплової енергії; 11 – вхідна лінія мережевої води; 12 – точки відбору гарячої та холодної води; 13 – стіни будинку.

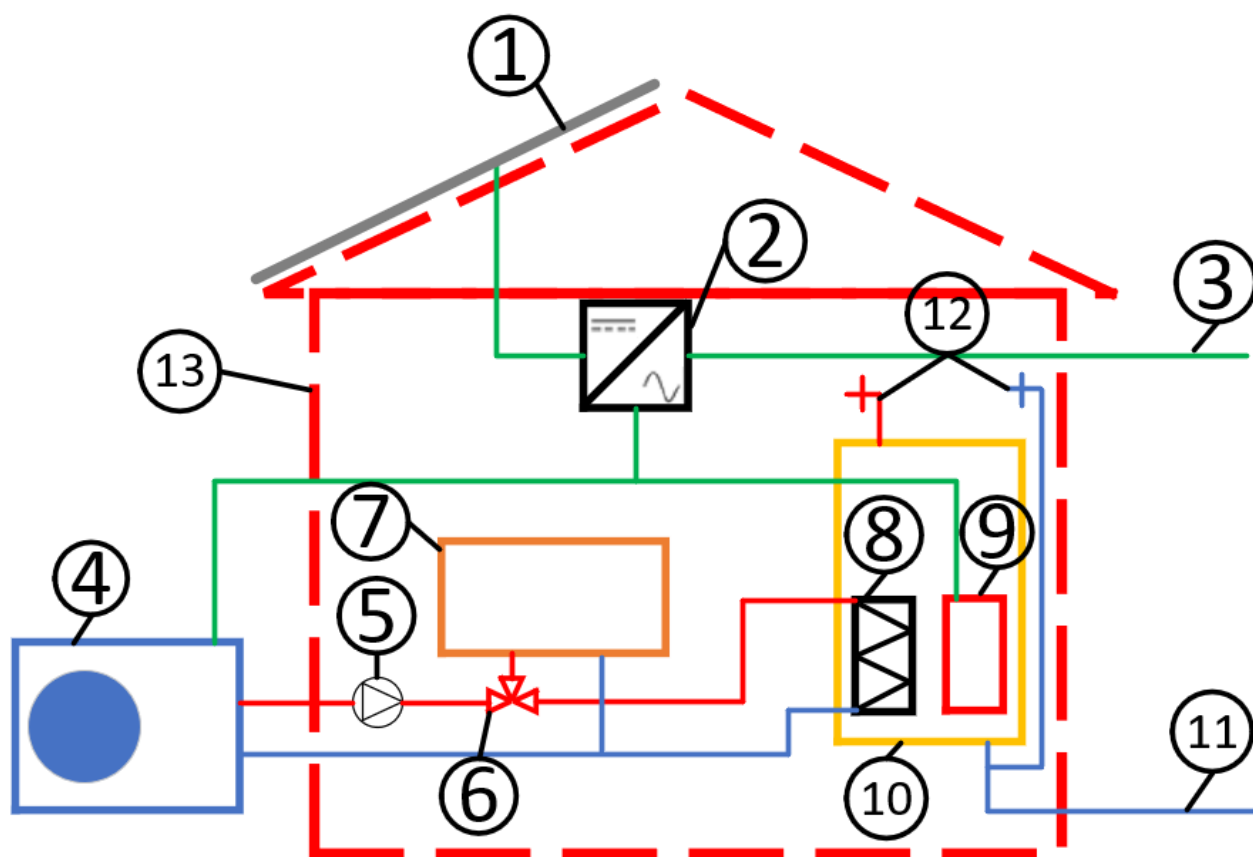


Рисунок. 2.7 – Розташування складових системи опалення приватного будинку

Розглянемо схему досліджуваного об'єкта. Основними її елементами є тепловий насос і ТЕН, оскільки обидва пристрої в схемі є теплогенеруючими одиницями. Теплова енергія від теплового насоса передається в бак-акумулятор теплової енергії через теплообмінник, ефективність якого приймемо рівною 0,8. Ефективність передачі теплоти від поверхні ТЕНа до води в баку приймемо рівною 1, оскільки вся електрична енергія, спожита ним, перетвориться в тепло, а змійовик ТЕНа повністю занурений у воду.

Зміна напрямку потоку теплоносія регулюється за допомогою триходового крана, який має два положення. В кожен момент часу теплоносій може подаватися або на радіатори опалення або на теплообмінник в бак-акумуляторі.

Якщо температура в приміщенні опускається нижче встановленого рівня, триходовий кран спрямовує гарячий теплоносій з теплового насоса на

радіатори опалення. Коли температура повітря в приміщенні піднімається вище встановленого значення, а також коли є потреба у нагріванні води в акумулюючій ємності, кран подає теплоносій в теплообмінник акумулюючої ємності. Коли немає необхідності обігрівати приміщення та нагрівати воду в акумулюючій ємності, кран перекривається, рух теплоносія у вторинному контурі теплового насоса припиняється і одночасно з цим зупиняється робота теплового насоса.

Коли тепловий насос працює на опалення будівлі, теплоносій з його вторинного контуру направляється на радіатори по трубах. Радіатори передають теплову енергію предметам всередині приміщення (в основному стінам та меблям).

Коли на радіатори подається гарячий теплоносій, температура повітря в приміщенні зростає. Саме ця температура вимірюється датчиком температури контролера системи опалення. Від значення температури в приміщенні залежить напрямок теплоносія з теплового насосу, як зазначено вище. Допустимий діапазон температури повітря в приміщенні згідно з ДБН-В.2.6-31 становить 18-22°C [16]. Відповідно, для контролера системи опалення буде встановлено мінімальне значення температури повітря в будівлі на рівні 18°C. Максимальне значення для холодної пори року – 22°C, а для теплої пори року максимальна температура повітря в приміщенні буде обмежуватися температурою навколишнього середовища. Тобто приймаємо, що тепловий насос не працює на кондиціонування приміщення.

Будівля зазнає теплових втрат у навколишнє середовище через стіни, вікна і дах. Питомий опір теплопровідності будинку обчислимо як суму теплових опорів стін, вікон і даху. Попередньо визначимося із геометрією будівлі. Обчислене значення теплового опору будівлі буде використано при роботі програми.

$$R_{eq} = \frac{(R_{wall_eq} \cdot R_{roof})}{(R_{wall_eq} + R_{roof})} = \frac{(0,005 \cdot 0,072)}{(0,005 + 0,072)} = 0,0045 \left(\frac{K}{B\Gamma} \right) \quad (2.1)$$

де:

$$R_{wall_eq} = \frac{(R_{wall} \cdot R_{wind})}{(R_{wall} + R_{wind})} = \frac{0,037 \cdot 0,006}{0,037 + 0,006} = 0,005 = \left(\frac{K}{B\Gamma} \right) \quad (2.2)$$

R_{wall_eq} – еквівалентний тепловий опір стін та вікон, $\frac{K}{B\Gamma}$;

$$\begin{aligned} R_{wall} &= R_{brick} + R_{wool} = \frac{L_{brick}}{(k_{brick} \cdot S_{wall})} + \frac{L_{wool}}{(k_{wool} \cdot S_{wall})} = \\ &= \frac{0,48}{(0,85 \cdot 180,6)} + \frac{0,25}{(0,04 \cdot 180,6)} = 0,037 \left(\frac{K}{B\Gamma} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$R_{wind} = \frac{L_{wind}}{(k_{wind} \cdot S_{wind})} = \frac{0,032}{(0,8 \cdot 7,2)} = 0,006 \left(\frac{K}{B\Gamma} \right) \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} R_{roof} &= R_{shell} + R_{wool} = \frac{L_{shell}}{(k_{shell} \cdot S_{shell})} + \frac{L_{wool}}{(k_{wool} \cdot S_{wall})} = \\ &= \frac{0,005}{(0,8 \cdot 86,9)} + \frac{0,25}{(0,04 \cdot 86,9)} = 0,072 \left(\frac{K}{B\Gamma} \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

де:

R_{wall} , R_{brick} , R_{wool} , R_{roof} , R_{shell} – тепловий опір цегли, скловати склопакету та покрівлі відповідно, $\frac{K}{B\Gamma}$;

L_{brick} , L_{wool} , L_{wind} , L_{shell} – товщина шару цегли, скловати, склопакету та покрівлі відповідно, м;

k_{brick} , k_{wool} , k_{wind} , k_{shell} – коефіцієнти теплопровідності цегли, скловати склопакету та покрівлі відповідно, $\frac{B\Gamma}{m \cdot ^\circ C}$;

S_{wind} , S_{wall} , S_{shell} – площа стіни будинку, вікон та покрівлі відповідно, m^2 ;

$$S_{wind} = n_{wind} \cdot H_{wind} \cdot L_{wind} = 6 \cdot 1,2 \cdot 1 = 7,2(m^2) \quad (2.6)$$

$$S_{wall} = W_{wall} \cdot H_{wall} \cdot L_{wall} = 7 \cdot 3 \cdot 8,6 = 180,6(m^2) \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} S_{shell} &= \left(\frac{W_{wall}}{2 \cdot \tan(\alpha)} \cdot L_{wall} \right) + \left(\frac{2}{\sin(\alpha) \cdot L_{wall}} \cdot \left(\frac{W_{wall}}{2 \cdot \tan(\alpha)} \right) \right) = \\ &= \left(\frac{7}{2 \cdot \tan(30^\circ)} \cdot 8,6 \right) + \left(\frac{2}{\sin(30^\circ) \cdot 8,6} \cdot \left(\frac{7}{2 \cdot \tan(30^\circ)} \right) \right) = \\ &= 86,9(m^2) \end{aligned} \quad (2.8)$$

де:

n_{wind} – кількість вікон, шт;

H_{wind} , L_{wind} – висота і ширина вікон відповідно, м;

W_{wall} , H_{wall} , L_{wall} – ширина, висота і довжина будинку відповідно, м;

α – кут нахилу даху будинку.

Розглянемо більш детально бак-акумулятор. Його ємність встановлено рівною 200 літрів Холодна вода з мережі надходить у нижню частину бака-акумулятора і, нагріваючись від теплообмінника або ТЕНа, піднімається у верхню частину бака. Температуру мережевої води позначимо через T_x . Її значення для першої кліматичної зони України, в яку входить місто Київ, змінюється у діапазоні від $6^\circ C$ до $18^\circ C$ протягом року.

Температура води в акумулюючій ємності вимірюється двома датчиками температури: верхнім та нижнім. Нижній датчик передає в контролер системи опалення значення температури мережевої води, а верхній – нагрітої води. Приймаємо, що температура води в акумулюючій ємності змінюється не

поступово, а стрибкоподібно, тобто так, наче всередині ємності знаходиться термічний бар'єр між масою холодної та гарячої води і теплопередача між цими масами не відбувається.

Мінімальне значення температури гарячої води в акумулюючій ємності становить 43°C . Коли необхідно подати споживачеві гарячу воду, а її температура в баку менше 43°C або коли гарячої води в баку залишилося менше, ніж потрібно подати споживачеві, навантаження ГВП вважається незабезпеченим і тоді паралельно з тепловим насосом вмикається ТЕН, який живиться електроенергією з мережі.

При роботі на обігрівання приміщення теплоносії подається з теплового насоса на радіатори опалення через труби. Температура радіаторів при цьому приймається рівною температурі теплоносія на виході з теплового насоса. Втрати теплової енергії в трубах, які підводять теплоносії до радіаторів, не враховуються, адже ця тепла енергія також нагріває будівлю.

Якщо тепловий насос не може забезпечити достатню кількість теплоти для підтримання температури в будинку вище 18°C , то замість нього вмикається ТЕН, який живиться електроенергією з мережі і нагріває воду в акумулюючій ємності. В такому разі змінюється положення триходового крана: теплоносії для радіаторів опалення надходить не з вторинного контуру теплового насоса, а з бака-акумулятора, де його нагріває ТЕН.

2.5 Енергетичні характеристики теплового насоса

Для математичного моделювання обрано тепловий насос типу «повітря-вода» японського виробника Mitsubishi Electric моделі PUNZ-W50VHA2(-BS) [17]. На рисунках 3.8 та 3.9 представлено енергетичні характеристики теплового насоса – залежності коефіцієнта перетворення та вихідної теплової потужності від температури навколишнього середовища, а також температури теплоносія на виході. Зображені поверхні відповідають номінальній та

мінімальній тепловій потужності теплового насоса. Саме ці дані будуть використані для моделювання роботи теплового насоса.

Як бачимо, при номінальному режимі роботи тепловий насос може забезпечувати від 4 до 5 кВт теплової потужності при температурі теплоносія на виході від 35°C до 55°C з коефіцієнтом перетворення від 2 до 5 в залежності від пори року.

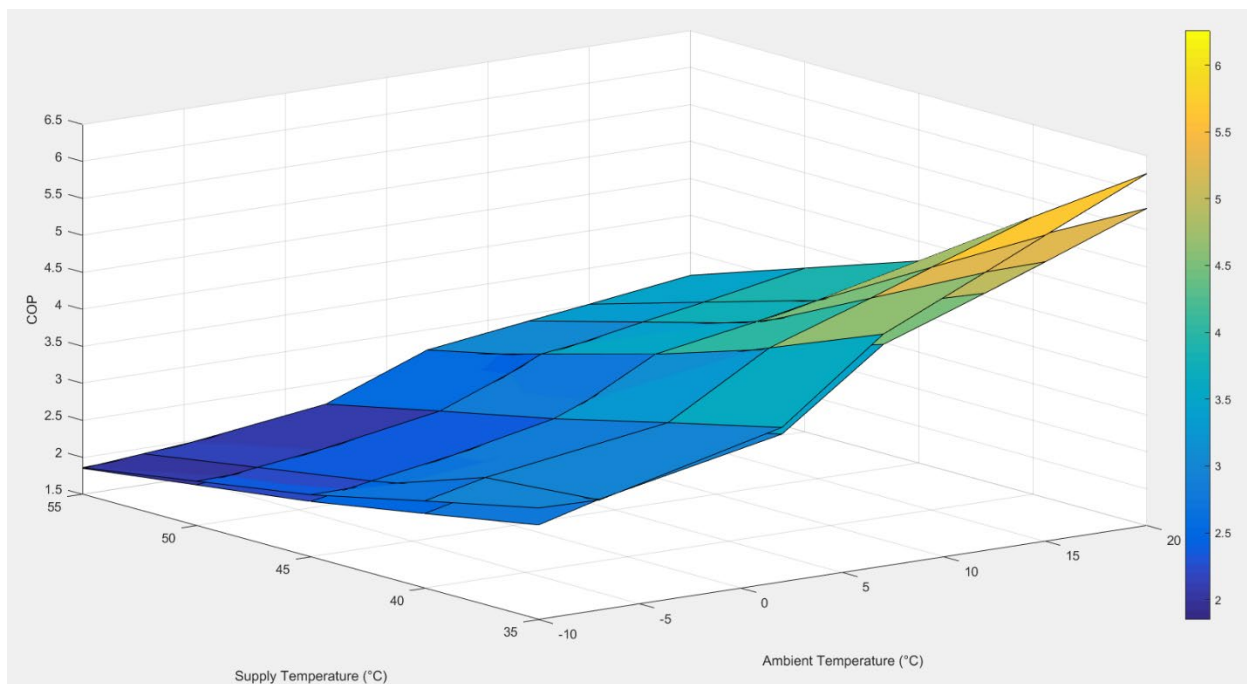


Рисунок 2.8 – Коефіцієнт перетворення теплового насоса як функція від температур навколишнього середовища і теплоносія на виході

При мінімальній вихідній тепловій потужності від 2,5 до 3,5 кВт, коефіцієнт перетворення теплового насоса дещо вищий, ніж при номінальному режимі роботи.

В холодну пору року на випарнику теплового насоса може утворюватися шар льоду, що перешкоджає передачі тепла та впливає на ефективність насоса в режимі обігріву. Тому більшість теплових насосів з повітрям у якості низькотемпературного джерела теплоти мають автоматичний цикл розморожування. Табличні дані, що використані для побудови поверхонь на рисунках 3.8 та 3.9 враховують паразитне споживання енергії, яке виникає при

періодичному розморожуванні при низьких температурах оточуючого середовища, відповідно до європейського стандарту EN 14511 [18].

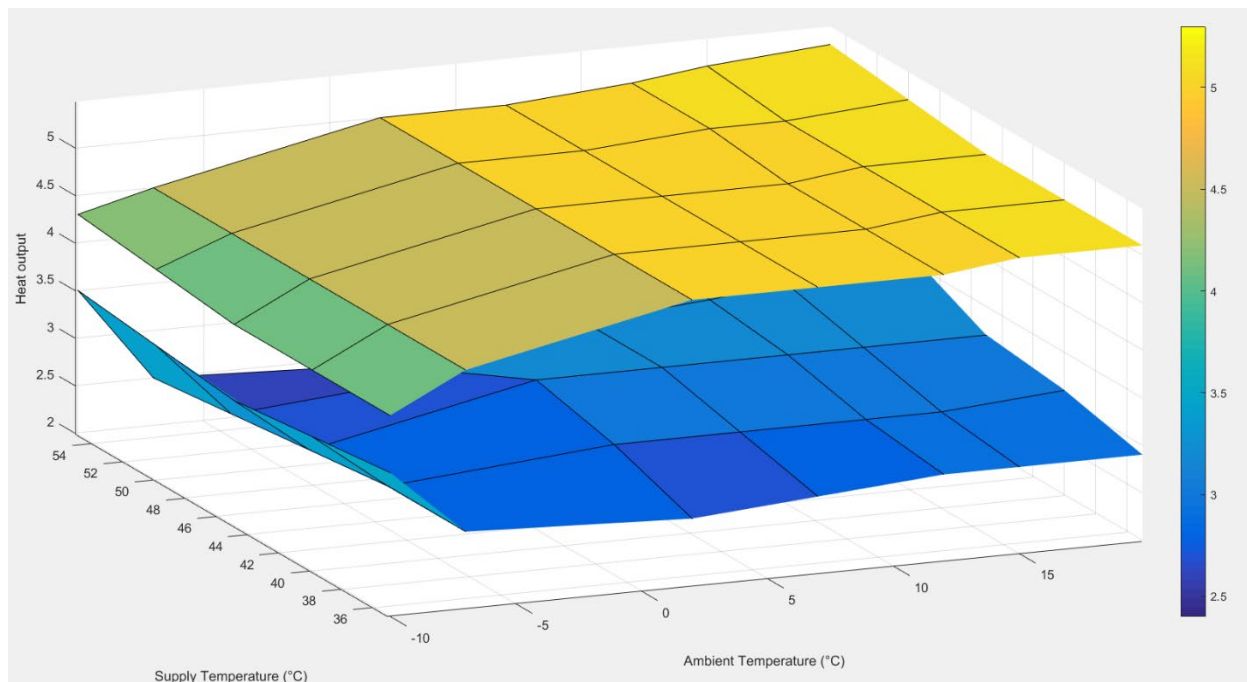


Рисунок 2.9 Залежність вихідної теплової потужності теплового насоса від температур навколишнього середовища і теплоносія на виході

В холодну пору року на випарнику теплового насоса може утворюватися шар льоду, що перешкоджає передачі тепла та впливає на ефективність насоса в режимі обігріву. Тому більшість теплових насосів з повітрям у якості низькотемпературного джерела теплоти мають автоматичний цикл розморожування. Табличні дані, що використані для побудови поверхонь на рисунках 3.8 та 3.9 враховують паразитне споживання енергії, яке виникає при періодичному розморожуванні при низьких температурах оточуючого середовища, відповідно до європейського стандарту EN 14511 [19].

Резервний електричний нагрівач видає стає значення теплової потужності у 5 кВт і працює тільки тоді, коли потреба в обігріві перевищує номінальну вихідну теплову потужність теплового насоса або коли температура навколишнього середовища виходить за межі робочого діапазону теплового насоса.

2.6 «Базовий» алгоритм роботи системи опалення

Для виявлення потенціалу оптимізації алгоритму розумного керування тепловим насосом необхідно порівняти результати моделювання з базовим алгоритмом керування системою. Більшість досліджень в літературі порівнюють експлуатаційні витрати оптимізованого алгоритму керування тепловим насосом з базовим варіантом на основі традиційних газових котлів [18, 19]. Недоліком такого підходу є те, що будь-які економічні або функціональні покращення можуть бути отримані завдяки зміні технології або припущенням щодо різниці в цінах для альтернативних джерел палива. У цій роботі базовим варіантом є та сама конфігурація системи опалення, натомість відрізняються лише алгоритми керування. Це дозволяє оцінити, чи можна досягти кращих результатів за допомогою стратегії розумного керування.

Початковий рівень «заряду» бака-акумулятора теплової енергії встановлюється визначається на рівні $46,5^{\circ}\text{C}$, тобто в початковий момент часу деяка кількість гарячої води вже доступна для забезпечення теплового навантаження.

Спрощена стратегія керування, використана в базовому випадку, полягає в наступному: заряд бака-акумулятора відбувається тоді, коли температура води у верхній або нижній частині бака опускається нижче мінімального порогового значення (43°C), та припиняється, коли температура води у баку перевищує максимальний пороговий рівень (50°C). У цьому базовому випадку як для нагрівання води для побутових потреб, так і для опалення приміщень використовується ТЕН, який працює з номінальною потужністю 5 кВт. Оскільки в цій спрощеній стратегії нагрівання води та увімкнення опалення активується на основі інформації з датчиків температури, бак-акумулятор гарячої води не може використовуватись для зміщення в часі періодів функціонування теплового насоса.

2.7 «Реакційний» алгоритм роботи системи опалення

Даний алгоритм роботи системи опалення передбачає переважне використання теплового насоса замість ТЕНа для забезпечення потреб опалення та ГВП. Тепловий насос живиться за рахунок енергії, яку генерує фотоелектростанція. У різні пори року потужність фотогенерації набуває різних значень і тому робота теплового насоса від фотоелектростанції має мінливий характер, що відображається на тепловій потужності, яку забезпечує тепловий насос. Також через залежність КПД від температури навколишнього середовища, ефективність теплового насоса взимку нижча, аніж влітку.

Логіка функціонування системи опалення виглядає наступним чином: нагрівання води в акумулюючій ємності відбувається при зниженні температури теплоносія до мінімального порогового значення (43°C), і припиняється, коли температура води у баку досягає максимального порогового рівня (50°C). Нагрівання води для потреб ГВП та опалення відбувається за рахунок теплового насоса, що живиться від фотоелектростанції. У випадках, коли фотоелектростанція не здатна забезпечити достатню електричну потужність для роботи теплового насоса, його живлення відбувається від мережі. Бак-акумулятор використовується лише як проміжна ємність для потреб ГВП, натомість для потреб опалення теплоносій в радіатори надходить із вторинного контуру теплового насоса.

2.8 «Економічний» алгоритм роботи системи опалення

Цей алгоритм керування системою опалення передбачає переважне забезпечення потреб опалення та ГВП за рахунок теплового насоса із живленням від електричної мережі. Очікується, що основною перевагою цього алгоритму буде можливість накопичувати теплову енергію протягом ночі, коли за двозонним лічильником електричної енергії є можливість економити 50% на вартості електроенергії з 23:00 до 7:00.

Температурний діапазон для увімкнення опалення такий самий, як і в попередніх алгоритмах. Початкова температура води в баку-акумуляторі становить $46,5^{\circ}\text{C}$. Верхня та нижня межі – 50°C та 43°C відповідно. Однак по мірі відбору теплової енергії з ємності, температура води в ній може опускатися нижче встановлених 43°C . Це залежить від об'єму ємності і буде вважатися припустимим аж до відмітки у 30°C .

Ємність бака-акумулятора гарячої води на першій ітерації становитиме 200 літрів. Однак у наступних ітераціях об'єм бака буде збільшено у випадку нестачі теплоносія для забезпечення автономної роботи у періоди відключення теплового насоса. Таким чином буде встановлено необхідний об'єм бака-акумулятора для автономної роботи у за різних умов.

2.9 «Автономний» алгоритм роботи системи опалення

В даному алгоритмі основний акцент також зроблено на можливості використання акумулятора теплової енергії для забезпечення потреб як ГВП, так і опалення. Тобто тепловий насос працюватиме виключно на нагрівання води в баку. А з цієї ємності вона буде надходити у систему опалення та на потреби ГВП. Бак-акумулятор накопичуватиме енергію вдень, коли потужність генерації фотоелектростанції дозволяє повноцінне функціонування теплового насоса. У випадку нестачі потужності фотогенерації тепловий насос буде отримувати живлення від мережі.

У цьому алгоритмі температурні режими вмикання опалення та нагрівання ємності такі ж, як у попередньому. Також буде визначено ємність бака-акумулятора, необхідну для нормального функціонування системи опалення для порівняння із результатами економічного алгоритму.

Висновки до розділу 2

1. Створено математичну модель споживача теплової енергії гарячого водопостачання, сформований за допомогою програмного забезпечення DHWCalc, що будує графік відбору води в літрах на хвилину;
2. Розроблено блоки ініціалізації вихідних параметрів для проведення математичного моделювання роботи системи опалення за чотирма різними алгоритмами функціонування, а саме: енергії сонячного випромінювання, температури навколишнього середовища, графіків вартості електричної енергії для чотирьох сезонів року;
3. Створено математичну модель фотоелектростанції, яка на вході приймає значення температури навколишнього середовища, енергії сонячного випромінювання і розраховує потужність фотогенерації з врахуванням температурного коефіцієнта потужності фотомодулів;
4. Розроблено математичну модель теплового насоса, яка на вході приймає значення температури навколишнього середовища, теплоносія вторинного контуру, а також значення поточної потужності фотогенерації і на основі технічних характеристик теплового насоса обчислює теплову потужність, яку можна забезпечити при поточних умовах.
5. В межах блоку, що описує роботу теплового насоса також реалізовано математичну модель електричного водонагрівача, який вмикається тоді, коли тепловий насос не здатен у повній мірі забезпечувати енергією споживача;
6. Створено теплову модель будинку, яка описує процеси перетікання теплової енергії між будівлею, навколишнім середовищем та системою опалення. в межах якої розраховано еквівалентний тепловий опір будівлі на основі фізичних характеристик матеріалів, з яких його побудовано;

7. Розроблено математичну модель триходового крана, який спрямовує потік теплоносія з теплового насоса в систему опалення або систему гарячого водопостачання;
8. Створено математичну модель бака-акумулятора теплової енергії, яка описує процеси передачі теплової енергії від вторинного контуру теплового насоса та від ТЕНа до гарячої води, яка слугує теплоносієм для потреб опалення та гарячого водопостачання;
9. Реалізовано блок обліку використання електроенергії на потреби опалення та гарячого водопостачання та обчислення вартості затраченої електроенергії
10. Визначено чотири алгоритми функціонування системи опалення на основі теплового насосу та фотоелектростанції, а саме: базовий, реакційний, економічний та автономний.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВОГО НАСОСА І ФОТОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

3.1 Опис алгоритму роботи програми

Для реалізації математичної моделі було обрано графічне програмне середовище SIMULINK. Нижче наведено загальний вигляд блоків виконання програми, а також алгоритм роботи програми.

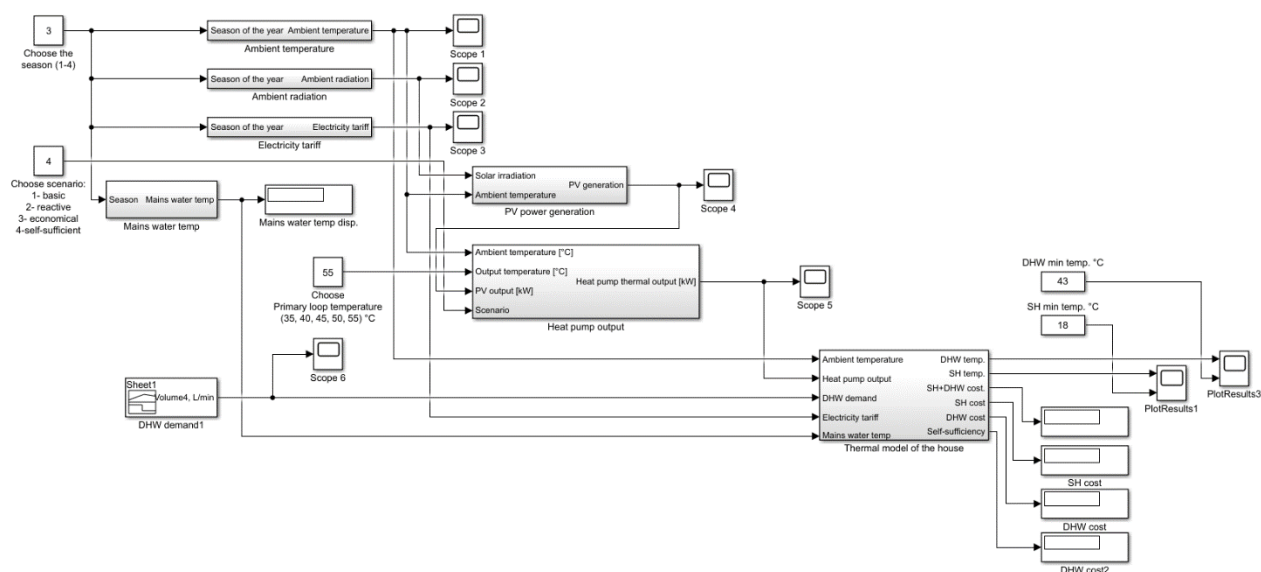


Рисунок 3.1 – Блок-схема системи опалення у середовищі SIMULINK

Для вибору конкретного алгоритму функціонування системи опалення, а також пори року, для якої будуть проводитись обчислення, необхідно ввести відповідні значення в блоки вводу – Choose the season та Choose scenario. Перший відповідає за пору року (від 1 до 4 – починаючи з зими), а другий – за вибір алгоритму функціонування (1 – «базовий», 2 – «реакційний», 3 – «економічний», 4 – «автономний»).

На основі введених значень формуються графіки вихідних значень для проведення подальших розрахунків, такі як графік зміни температури навколишнього середовища (блок Ambient temperature), графік надходження енергії сонячного випромінювання (блок Ambient radiation) та графік

середньомісячної вартості електроенергії (блок Electricity tariff) для вибраної пори року.

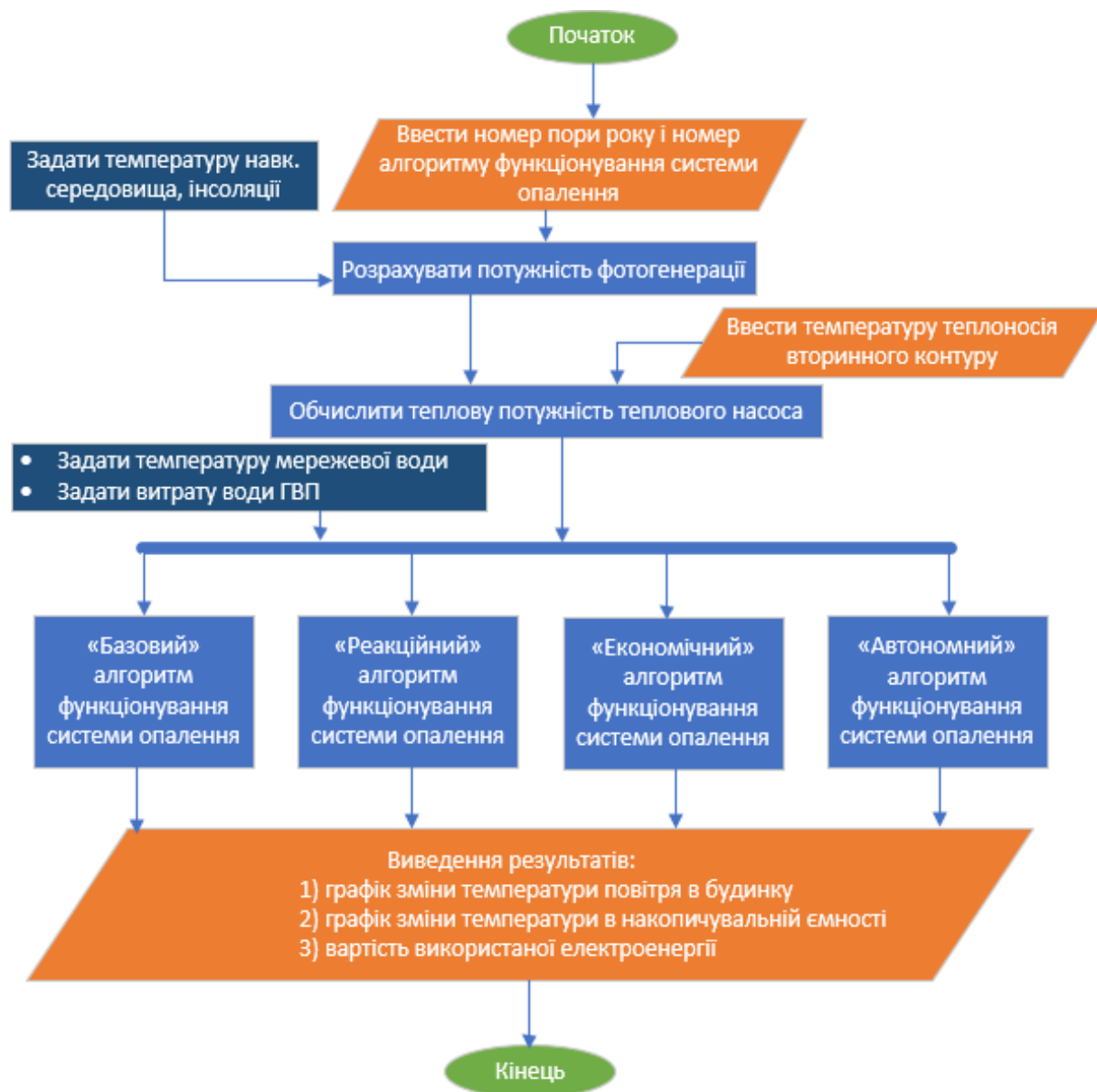


Рисунок 3.2 – Алгоритм роботи програми

Також на даному етапі встановлюється температура мережевої води, яка для другої кліматичної зони, до якої належить місто Київ, коливається від 6°C взимку до 18°C влітку. Блок Mains water temp. формує на виході значення температури мережевої води в залежності від вхідного значення пори року. Структура чотирьох описаних блоків аналогічна і наведена на рисунку 3.4.

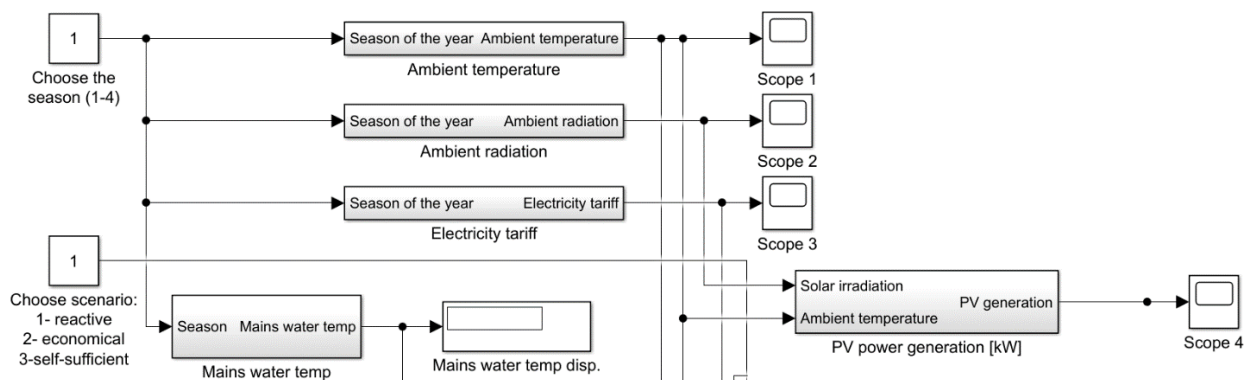


Рисунок 3.3 – Фрагмент схеми із полями вводу умов використання системи опалення

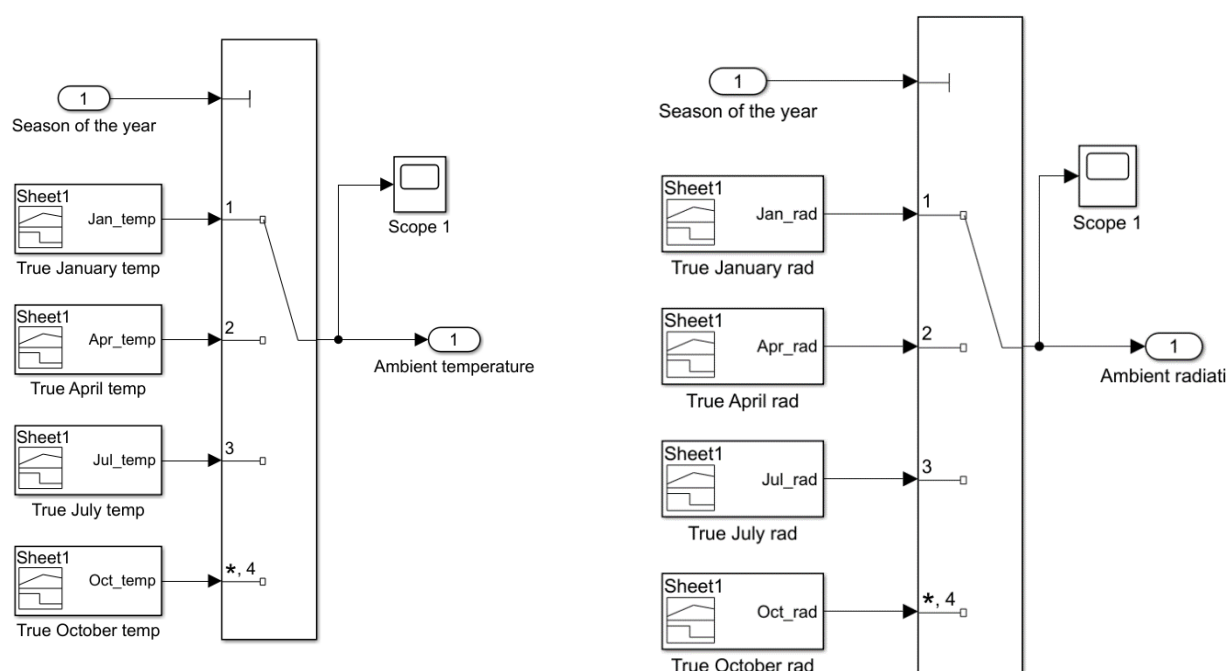


Рисунок 3.4 – Структура блоків Ambient temperature та Ambient radiation

Блок PV power generation розраховує потужність генерації дахової фотоелектростанції за формулою (2.1) [21]. На вході він приймає значення інтенсивності сонячної радіації і температури навколишнього середовища. При виконанні розрахунку враховано вплив нагрівання поверхні фотомодулів на потужність фотоелектростанції.

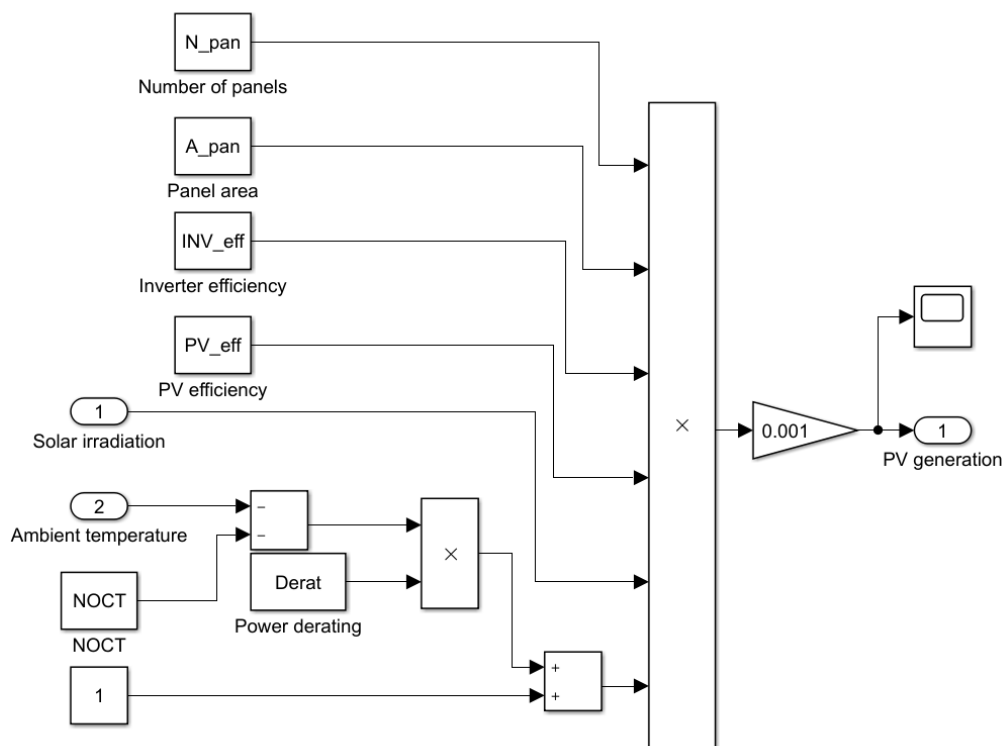


Рисунок 3.5 – Структура блоку PV power generation

Графік відбору води на потреби гарячого водопостачання у літрах на хвилину прийнято однаковим незалежно від пори року і задано через блок Signal Builder, графічне вікно якого наведено на рисунку 3.5.

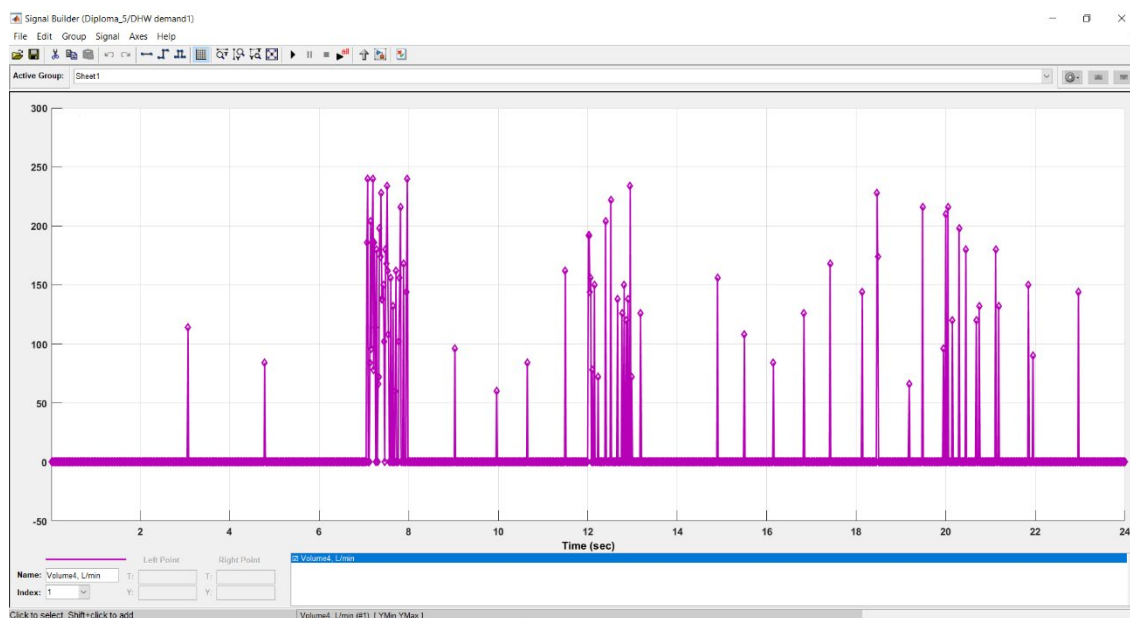


Рисунок 3.6 – Графік відбору гарячої води у літрах на хвилину

Графіки вихідних величин із блоків Ambient temperature, PV power generation, Secondary loop temperature та Scenario надходять до блоку Heat

pump output. Блок Secondary loop temperature задає температуру теплоносія вторинного контуру теплового насоса, яка може коливатися в діапазоні від 35°C до 55°C згідно з технічними характеристиками теплового насоса. Однак в умовах даної математичної моделі прийнято змінювати температуру з кроком у 5°C.

Блок Heat pump output розраховує теплову потужність теплового насоса. Тут обробляються вхідні параметри, від яких залежить коефіцієнт перетворення та вихідна теплова потужність установки. Фактично, відбувається перетворення значень температури навколишнього середовища і температури теплоносія вторинного контуру згідно графіків, наведених на рисунках 3.6 та 3.7.

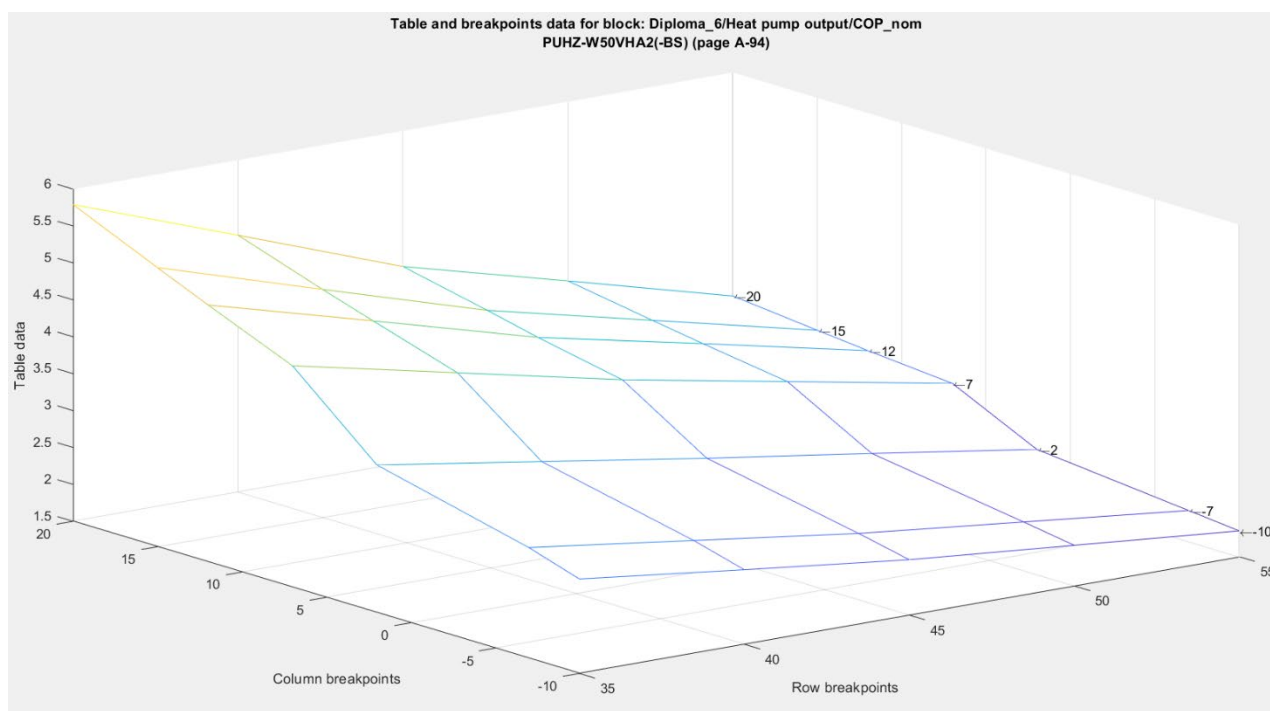


Рисунок 3.7 – Коефіцієнт перетворення теплового насоса як функція від температур навколишнього середовища і теплоносія на виході

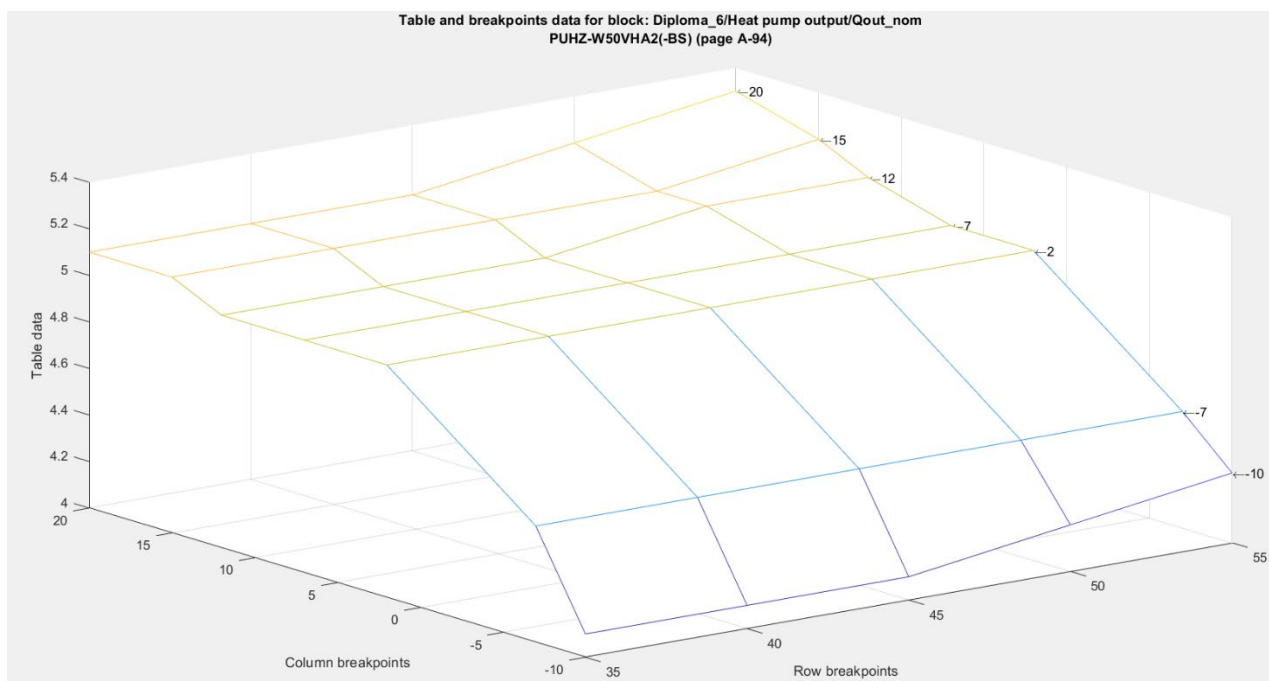


Рисунок 3.8 – Залежність вихідної теплової потужності теплового насоса від температур навколишнього середовища і теплоносія на виході

На основі отриманих вихідної теплової потужності та коефіцієнта перетворення теплового насоса для заданих умов обчислюється електрична потужність, необхідна для роботи теплового насоса при заданих параметрах. Вона порівнюється із потужністю генерації фотоелектростанції. Якщо вона достатня для роботи теплового насоса у номінальному або мінімальному режимі, то живлення надходить від фотоелектростанції. Якщо ж потужності фотогенерації не вистачає, тепловий насос отримує електроенергію з мережі. Або вмикається електричний водонагрівач, який також живиться мережевою електроенергією.

Наступний блок – тепла модель власне системи опалення, основні структурні елементи якої: датчики температури внутрішнього простору будинку та бака-акумулятора, контролер подачі теплової енергії на забезпечення опалення та ГВП, блок, що описує теплову модель будинку та бака-акумулятора, блоки розрахунку вартості енергії, затраченої на опалення та на ГВП, а також блоки для виведення проміжних результатів обчислень наведені на рисунку 3.8.

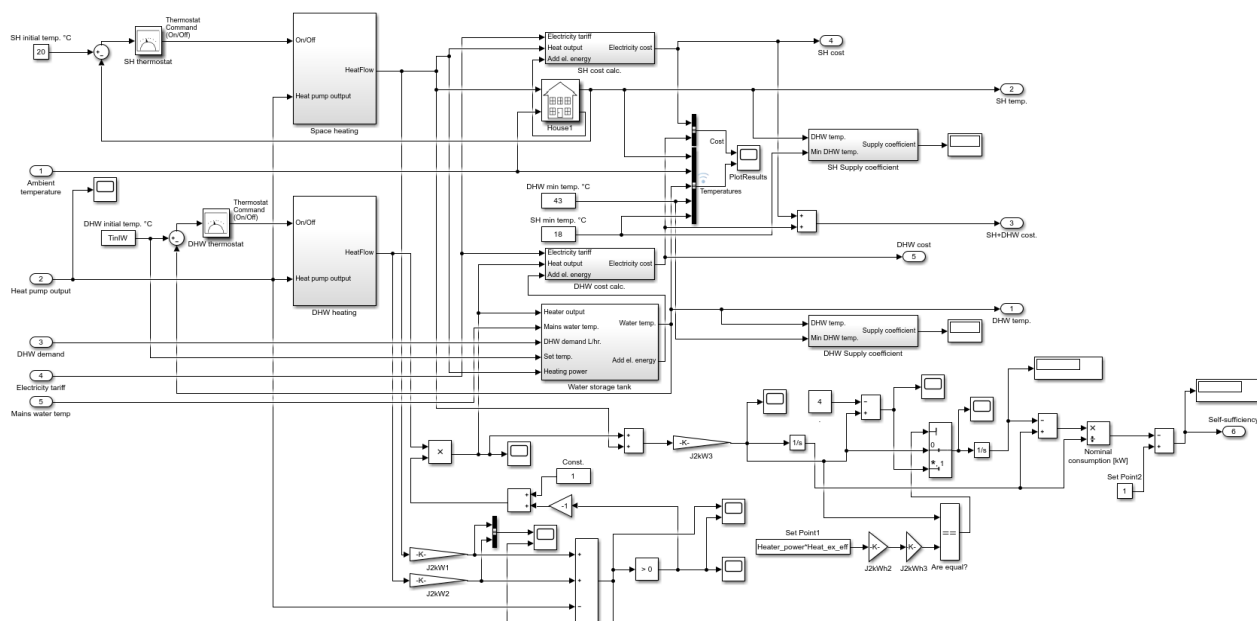


Рисунок 3.9 – Структура блоку Thermal model of the house

Блоки датчика температури, контролера подачі теплової енергії і теплової моделі будинку і бака-акумулятора утворюють схему зі зворотним зв'язком: на основі даних про температуру в будинку і води в ємності, термостат формує логічний сигнал про необхідність подачі додаткової теплової енергії в один із контурів. Цей сигнал надходить на контролер, який визначає кількість енергії, яку можна спрямувати на забезпечення поточних потреб і формує два окремих сигнали: кількість енергії на потреби опалення та на потреби ГВП. Далі ці сигнали проходять через математичну репрезентацію триходового крана – частину схеми, яка за наперед встановленим пріоритетом спрямовує енергію лише на опалення або лише на ГВП. Далі окремо розраховується вартість електроенергії на опалення та на ГВП і отримані дані сумуються. Результати роботи програми, а саме температура всередині будинку, температура теплоносія в баку-акумуляторі і вартість електроенергії виводяться у графічне вікно.

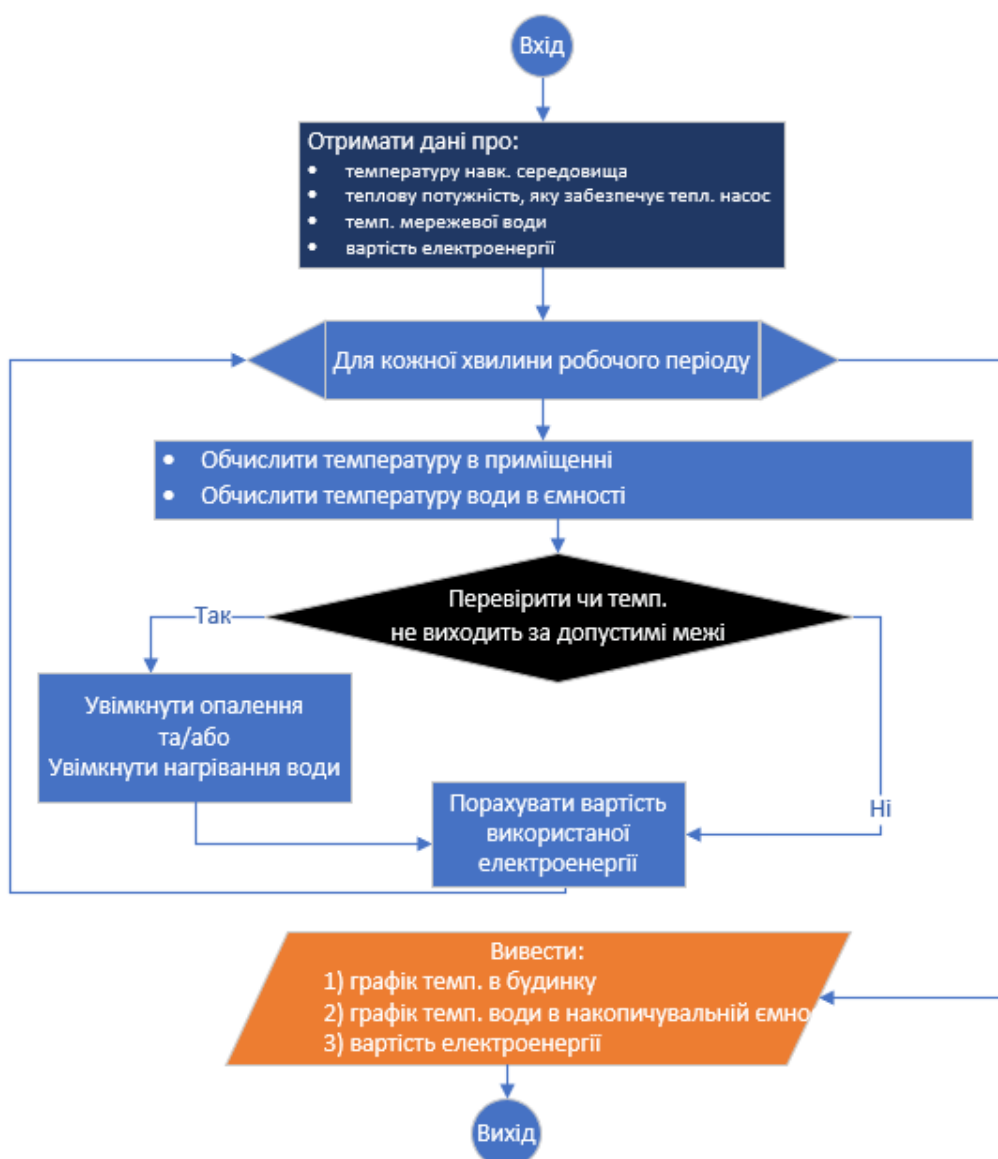


Рисунок 3.10 – Алгоритм роботи блоку Thermal model of the house

Для виконання програми, необхідно ввести номер пори року і вибрати алгоритм функціонування системи опалення. Для отримання повного переліку результатів, програму необхідно виконати 16 разів (4 алгоритми, 4 пори року).

3.2 Аналіз базового та реакційного алгоритмів функціонування системи опалення

Запустимо виконання програми «базового» алгоритму функціонування системи опалення для чотирьох сезонів протягом року. Як результат, отримаємо графіки зміни температури повітря в будинку, температури води в

накопичувальній ємності, а також вартість електроенергії, витраченої на потреби опалення та ГВП.

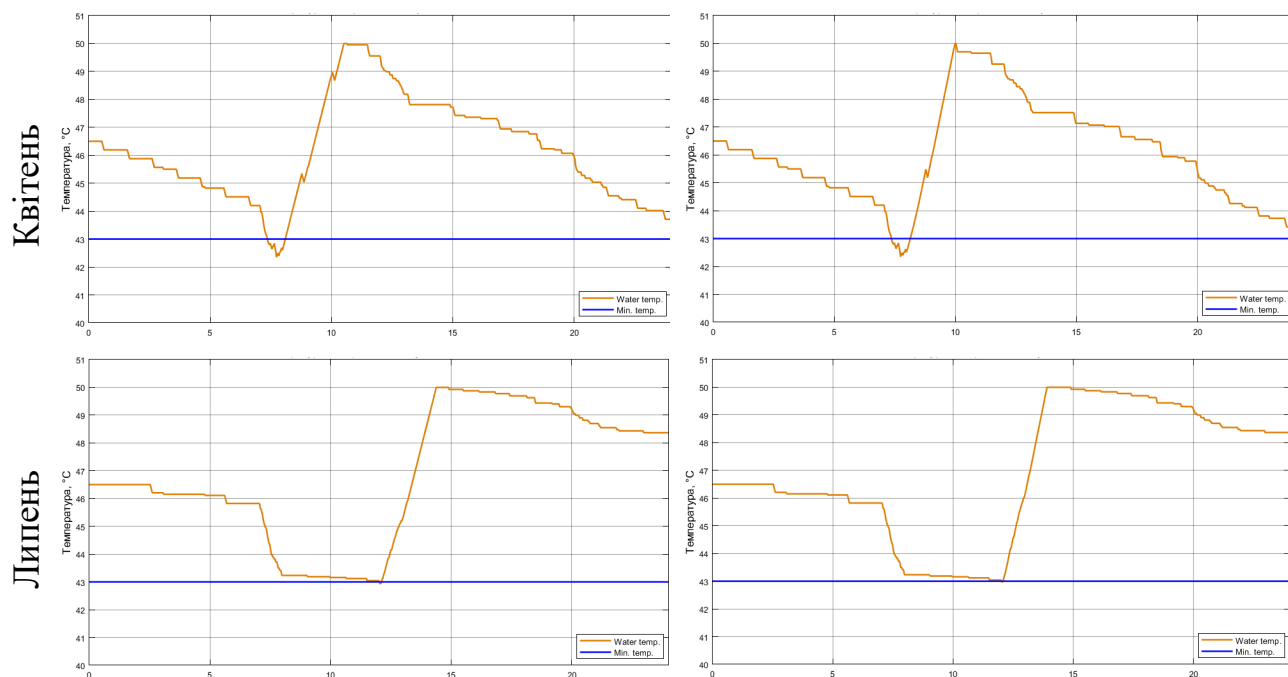


Рисунок 3.11 – Графіки зміни температури води в накопичувальній ємності для квітня та липня (базовий та реакційний алгоритми функціонування)

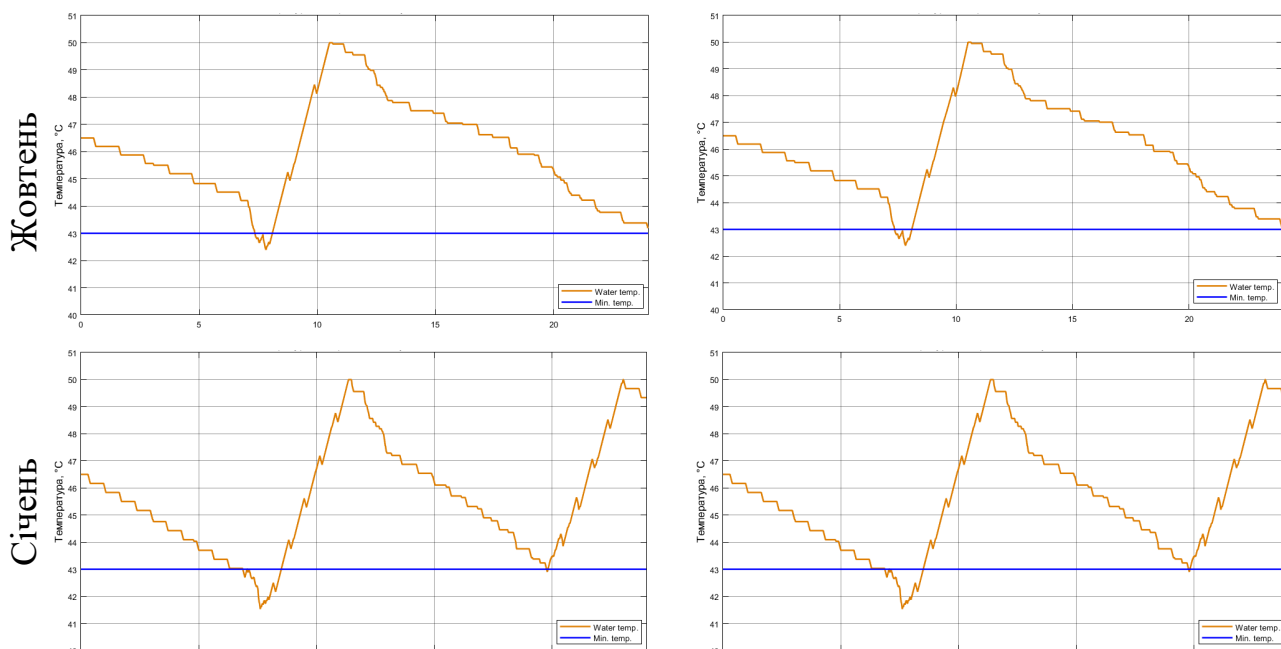


Рисунок 3.12 – Графіки зміни температури води в накопичувальній ємності для жовтня та січня (базовий та реакційний алгоритми функціонування)

Таблиця 3.1 – Вартість електроенергії на забезпечення опалення та ГВП

Місяць	Квітень		Липень		Жовтень		Січень	
	Базовий	Реакційний	Базовий	Реакційний	Базовий	Реакційний	Базовий	Реакційний
Вартість опалення, грн/доба	8,79	4,31	0,46	0,22	18,45	9,97	19,07	8,86
Вартість ГВП, грн/доба	18,92	9,83	10,1	5,41	40,87	20,36	40,63	18,89
Разом, грн/доба	27,71	14,14	10,56	5,63	59,32	32,14	59,7	27,75

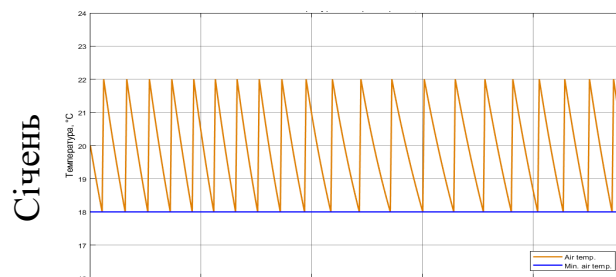
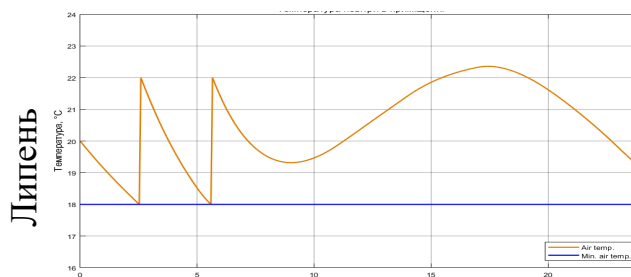
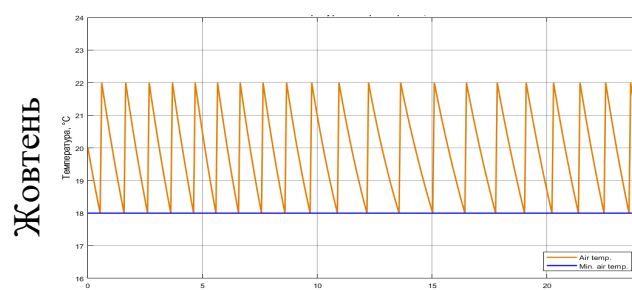
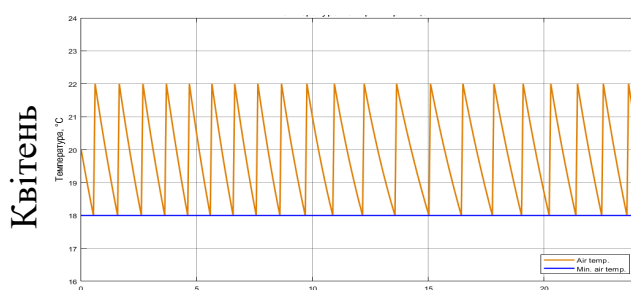


Рисунок 3.13 – Графіки зміни температури повітря в будинку протягом року (базовий та реакційний алгоритми функціонування)

Базовий алгоритм функціонування передбачає використання ТЕНа в якості єдиного джерела теплоти в системі опалення. Він нагріває воду в накопичувальній ємності, з якої вона надходить в радіатори опалення у якості теплоносія, а також використовується для забезпечення гарячого водопостачання. На отриманих графіках спостерігаємо коливання температури води в накопичувальній ємності у межах, встановлених термостатом

(43...50°C). Однак лише влітку температура води не падає нижче 43°C. Зменшення температури води відбувається в період підвищеного споживання гарячої води в ранкові та вечірні години (Рис. 2.5). Температура повітря в будинку не виходить за встановлені межі (18...22°C) в жоден із досліджуваних періодів. Аналізуючи графіки температури повітря в будинку, спостерігаємо лише збільшення частоти увімкнення опалення в більш холодну пору року і в періоди доби з нижчими значеннями температури навколишнього середовища. Також в липні спостерігаємо повне вимкнення опалення в будинку вже з 7 години ранку, оскільки температура навколишнього середовища протягом дня достатня для підтримання температури в будинку в межах 18-22°C.

За даними таблиці 3.1 спостерігаємо очікувану залежність вартості електроенергії в залежності від сезону. Однак вартість 1 кВт·год. електроенергії восени є вдвічі більшою, аніж навесні, тому й вартість опалення за відповідні періоди відрізняється вдвічі, незважаючи на те, що кількість енергії, необхідна для забезпечення опалення та ГВП навесні та восени практично однакова.

Реакційний алгоритм функціонування передбачає використання теплового насоса для забезпечення потреб опалення та гарячого водопостачання впродовж доби. Живлення теплового насоса забезпечується за рахунок фотоелектростанції, коли потужності фотогенерації достатньо для того, щоб тепловий насос вийшов на свою мінімальну або номінальну потужність. В інші періоди часу тепловий насос живиться електроенергією з мережі.

Графіки зміни температури повітря в будинку залишилися незмінними порівняно із базовим алгоритмом функціонування системи опалення, оскільки для контролера опалення підтримання температури в будинку має вищий пріоритет, аніж забезпечення ГВП.

Графіки зміни температури води в накопичувальній ємності демонструють схожу з базовим алгоритмом динаміку. Однак вартість електроенергії для забезпечення потреб опалення та ГВП суттєво скоротилася, як видно з таблиці 3.1. Навесні, влітку та восени вартість опалення та ГВП знизилася приблизно вдвічі. Це пояснюється тим, що тепловий насос витрачає менше електричної енергії для забезпечення тієї ж кількості теплоти, ніж електричний нагрівач, оскільки працює з вищим КПД. Взимку вартість електроенергії на опалення та ГВП не змінилась через те, що тепловий насос не вмикався взагалі, оскільки потужності фотогенерації було недостатньо навіть для роботи на мінімальній тепловій потужності. Тож 5,74 кВт встановленої потужності фотоелектростанції недостатньо для обраного теплового насоса в зимовий період.

3.2 Аналіз економічного та автономного алгоритмів функціонування системи опалення

Економічний алгоритм функціонування системи опалення передбачає експлуатацію теплового насоса із живленням від електричної мережі в нічний період доби, протягом якого діє коефіцієнт 0,5 на вартість електричної енергії.

При цьому для здобуття переваги від нічної експлуатації теплового насоса доцільно вмикати нагрівання акумулятора тепла щойно температура води опуститься нижче $49,5^{\circ}\text{C}$, оскільки після 7 години ранку контролер перестане подавати теплоносій в бак і протягом усієї світлої частини доби потреби опалення та ГВП будуть забезпечуватися за рахунок теплової енергії, накопиченої в ємності до 7 години ранку.

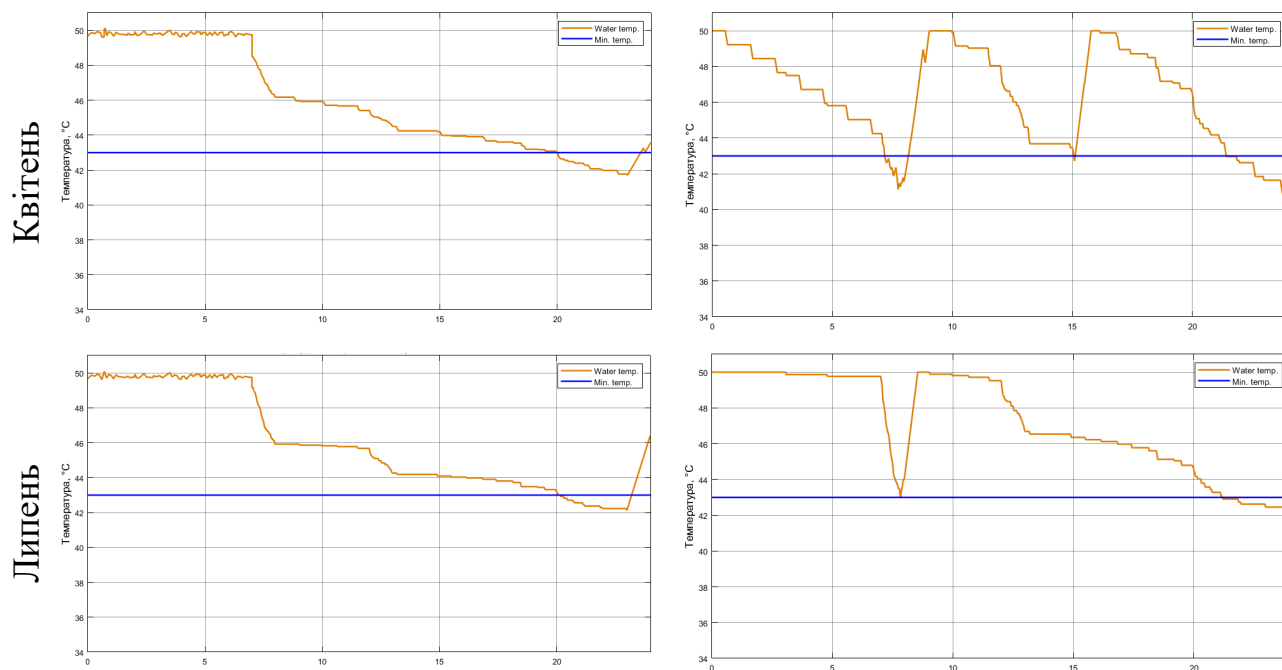


Рисунок 3.11 – Графіки зміни температури води в накопичувальній ємності для квітня та липня (економічний та автономний алгоритми функціонування)

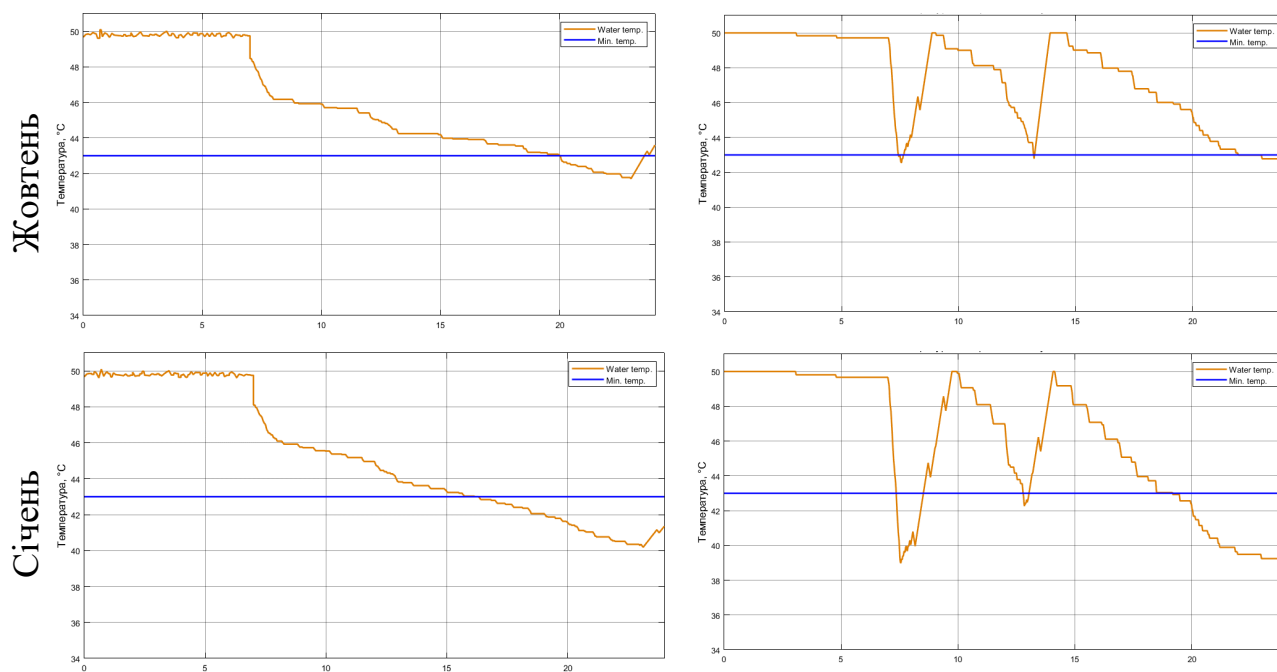


Рисунок 3.12 – Графіки зміни температури води в накопичувальній ємності для жовтня та січня (економічний та автономний алгоритми функціонування)

Таблиця 3.3 – Вартість електроенергії на забезпечення опалення та ГВП

Місяць	Квітень		Липень		Жовтень		Січень	
	Економічний	Автономний	Економічний	Автономний	Економічний	Автономний	Економічний	Автономний
Вартість опалення, грн/доба	8,79	4,33	0,46	0,46	18,45	19,66	19,07	8,86
Вартість ГВП, грн/доба	10,90	8,792	7,23	0,87	30,72	38,48	34,87	18,89
Разом, грн/доба	19,69	13,12	7,69	1,33	49,17	33,54	53,94	27,75

Також при виконанні програми шляхом підбору було встановлено мінімальну ємність бака-акумулятора для кожної пори року, з якою температура води в баку не виходить за нижню межу 40°C. Для економічного алгоритму функціонування мінімально необхідна ємність бака становить 1,5 м³, 0,8 м³, 1,5 м³ та 2 м³ для весни, літа, осені та зими відповідно, що значно перевищує об'єм 0,2 м³, який було використано для базового та реакційного алгоритмів. Для автономного алгоритму функціонування також було визначено мінімально необхідну ємність бака: 0,4 м³, 0,4 м³, 0,4 м³ та 0,8 м³ для весни, літа, осені та зими відповідно.

В автономному алгоритмі використання теплового насоса відбувається в світлову частину доби, коли живлення надходить від фотоелектростанції. За рахунок цього вдається досягти нижчої вартості забезпечення опалення та ГВП, ніж для економічного алгоритму функціонування, оскільки зменшена потреба на використання електроенергії на опалення та ГВП.

Для характеристики рівня автономності кожного з алгоритмів функціонування розрахуємо коефіцієнт забезпеченості електричною енергією

як відношення кількості енергії, спожитої від фотоелектростанції до загальної кількості електроенергії, використаної на потреби опалення та ГВП:

$$K_{ss} = \frac{\sum W_{PV}}{\sum W_{cons}} \quad 3.1$$

K_{ss} – коефіцієнт забезпеченості електроенергією;

W_{PV} – кількість електроенергії, спожита від фотоелектростанції на потреби опалення та ГВП;

W_{cons} – загальна кількість електроенергії, використана на потреби опалення та ГВП;

Таблиця 3.4 – Коефіцієнт забезпеченості електроенергією

Місяць	Квітень	Липень	Жовтень	Січень
	Коефіцієнт забезпеченості			
Базовий	0	0	0	0
Реакційний	0,23	0,36	0,15	0
Економічний	0	0,06	0	0
Автономний	0,56	0,96	0,36	0

Для базового та економічного алгоритмів функціонування системи опалення коефіцієнти забезпеченості електроенергією у різні пори року дорівнюють нулю. Адже для базового алгоритму не передбачено використання фотоелектростанції в ролі джерела живлення електричного водонагрівача. А для економічного алгоритму живлення теплового насоса надходить від фотоелектростанції лише протягом короткого проміжку часу влітку. Також для всіх алгоритмів функціонування коефіцієнт забезпеченості електроенергією взимку рівний нулю. Це свідчить про те, що встановленої

потужності фотоелектростанції не вистачає для того, аби тепловий насос працював навіть на мінімальній тепловій потужності.

Для реакційного алгоритму функціонування коефіцієнт забезпеченості електроенергією досягає 36% в липні. Цей показник фактично міг би сягати 100%, зважаючи на те, що влітку на практиці відсутня необхідність увімкнення опалення для підтримання температури в будинку у межах 18...22°C. Однак в межах математичної моделі в нічний період доби тепловий насос все ж вмикається для забезпечення потреб опалення будинку. Саме через це коефіцієнт забезпеченості є меншим.

Потреба в тепловій енергії для забезпечення гарячого водопостачання повністю задовольняється тепловим насосом із живленням від фотоелектростанції в денний період доби. Також цьому сприяє підвищена ємність бака-акумулятора і налаштування контролера системи опалення на увімкнення нагрівання води при падінні її температури до 49,5°C, а не до 43°C. Це дає змогу накопичити достатню кількість теплової енергії води в ємності для того, аби задовольнити потреби споживача у вечірній і ранковий періоди доби.

Навесні та восени коефіцієнт забезпеченості електроенергією становить 23% та 15% відповідно. В ці сезони є необхідність вмикати опалення в періоди відсутності фотогенерації, а також збільшується кількість енергії, необхідна для нагрівання мережевої води до температури 50°C. Однак тепловий насос в денний період доби виходить на номінальну теплову потужність. Тому збільшення встановленої потужності фотоелектростанції не призведе до суттєвого збільшення коефіцієнта забезпеченості. Більшого ефекту на цей показник вдасться досягти за рахунок збільшення об'єму бака-акумулятора.

Для автономного алгоритму функціонування системи опалення показники забезпеченості електроенергією в середньому більш ніж вдвічі перевищують відповідні показники для реакційного алгоритму для весни та

осені і наближаються до 100% влітку. Це пояснюється функціонуванням теплового насоса лише в період з 7:00 до 23:00. За рахунок цього збільшена частка використання енергії фотогенерації для забезпечення потреб теплового насоса. Однак все ж присутня деяка кількість імпортованої з мережі електроенергії. Її частку можна зменшити за рахунок збільшення ємності бака-акумулятора або меншою мірою – за рахунок збільшення встановленої потужності фотоелектростанції. Однак останній варіант менш доцільний з огляду на те, що після його реалізації влітку утвориться значний надлишок електроенергії, яку генерує фотоелектростанція.

Висновки до розділу 3

1. Проведено математичне моделювання системи опалення приватного будинку на основі теплового насоса і фотоелектростанції за чотирма алгоритмами функціонування: базовим, реакційним, економічним та автономним.

2. Для кожного алгоритму функціонування системи опалення побудовано графіки зміни температури в будинку та води в накопичувальній ємності. На основі отриманих даних зроблено висновки:

- при базовому алгоритмі функціонування для підтримання температури в будинку та в ємності достатньо 4 кВт потужності електричного водонагрівача;
- при реакційному алгоритмі тепловий насос дозволяє знизити кількість спожитої електроенергії з мережі в середньому на 50% протягом року;
- в зимовий період зменшення експлуатаційних витрат на функціонування системи опалення вдалося знизити лише за рахунок використання теплового насоса замість електричного водонагрівача. Наявність фотоелектростанції не впливає на експлуатаційні витрати;

- для економічного алгоритму функціонування системи опалення необхідно збільшення ємності бака-акумулятора у 4...10 разів порівняно із базовою ємністю 200 літрів для забезпечення потреб опалення та ГВП. Така модифікація суттєво підвищує вартість системи і термін її окупності;
- автономний алгоритм експлуатації демонструє найнижчі показники експлуатаційних витрат на опалення та ГВП. Для того, аби досягти зниження експлуатаційних витрат, мінімально необхідна встановлена потужність фотоелектростанції має бути достатньою для функціонування теплового насоса на номінальній тепловій потужності.
- коефіцієнт забезпеченості електроенергією найбільший для літньої пори року при автономному алгоритмі функціонування. Для його підвищення більш доцільно нарощувати ємність бака-акумулятора, аніж встановлену потужність фотоелектростанції, оскільки протягом дня тепловий насос генерує достатню кількість енергії, але бракує ємності для її накопичення. Також накопичувальна ємність є більш дешевим елементом системи опалення.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Заходи безпеки під час монтажу та експлуатації теплових насосів

При встановленні теплового насосу для опалення і гарячого водопостачання необхідно переконатися, що його теплова потужність відповідає проекту та зможе компенсувати теплові втрати при розрахунковій температурі навколишнього середовища. Перед встановленням та експлуатацією теплового насоса потрібно уважно ознайомитися з керівництвом з експлуатації, виданим заводом-виробником.

Тепловий насос може бути змонтований та введений в експлуатацію тільки працівниками спеціалізованих установ, що мають ліцензію на проведення таких робіт, згідно проекту та керівництва з експлуатації, виданого заводом-виробником. Порушення вимог керівництва, або внесення змін у конструкцію теплового насосу без узгодження їх з підприємством-виробником не дозволяється і веде до втрати власником гарантій підприємства-виробника.

- тепловий насос може бути змонтований та введений в експлуатацію тільки працівниками спеціалізованих установ, що мають ліцензію на проведення таких робіт;
- забороняється експлуатувати тепловий насос особам, що не пройшли інструктаж з техніки безпеки й не ознайомлені із пристроєм і принципом його роботи та не досягли віку 18 років;
- забороняється експлуатувати тепловий насос при несправній автоматиці;
- забороняється розбирати й ремонтувати автоматику власноруч, вносити будь-які конструктивні зміни;
- тепловий насос повинен встановлюватись на жорсткій основі, розрахованій на масу теплового насосу в робочому стані;
- бак-акумулятор гарячої води повинен бути обладнаний перевіреним запобіжним клапаном;

- радіатори із закритим розширювальним резервуаром також повинні бути обладнані перевіреними манометром та запобіжним клапаном;
- трубопроводи холодної та гарячої води і перепускні труби від запобіжних клапанів повинні бути зроблені з жаро- та корозієстійких матеріалів, наприклад міді. запобіжний клапан перепускних труб повинен мати відкрите з'єднання із стоком в незамерзаючому середовищі;
- роботу з холодильним контуром повинен виконувати лише кваліфікований інженер, оскільки обладнання містить фторовмісний парниковий газ;

Установку можна вводити в експлуатацію тільки в тому випадку, якщо опалювальна система і система зовнішнього контуру були наповнені та з них було видалено повітря. В іншому разі можна пошкодити циркуляційні насоси. Якщо установка повинна функціонувати тільки на додатковому опаленні, спочатку слід переконатися, що опалювальна система заповнена і що циркуляційний насос і компресор не увімкнені.

Тепловий насос повинен транспортуватися та зберігатися завжди вертикально. Закріпіть тепловий насос так, щоб він не нахилився під час транспортування.

Для полегшення проведення сервісного обслуговування теплового насоса, його слід встановити на відстані 300 мм від стін. Також слід уникати встановлення теплового насоса у кутах приміщення.

Для запобігання протіканням необхідно переконатися, що з'єднувальні патрубки не перебувають під механічним напруженням. Після закінчення монтажу, необхідно перевірити систему опалення.

Як правило, всі електричні підключення всередині блоку теплового насосу виконані підприємством-виробником. Тому підключення електричної частини полягає у підключенні живлення, а також усіх датчиків температури і

допоміжних вузлів. Електричне підключення може виконуватись тільки кваліфікованим електриком. Для безпечної роботи з електротехнічною частиною даного проекту необхідно дотримуватися вимог ДНАОП 1.1.10-1.07-01 «Правила експлуатації електрозахисних засобів» [23], а також ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів і вимог безпеки «Правил улаштування електроустановок» [24]. Це дозволить уникнути виробничих травм в процесі монтажних, пусконаладжувальних та експлуатаційних робіт.

Вхідна лінія обов'язково повинна бути обладнана автоматичним вимикачем, вмонтованим в стаціонарну проводку будівлі і розміщеним в доступному місці, якомога ближче до теплового насосу, але обов'язково в тому ж приміщенні, де розміщений тепловий насос. Ввідний кабель може піддаватися вібрації, тому ввід повинен виконуватися належним чином. Необхідно залишати мінімум 300 мм вільного кабелю між тепловим насосом та комунікаційним каналом на поверхні приміщення, при цьому кабель повинен бути надійно закріплений на панелі теплового насосу.

4.2 Заходи безпеки під час монтажу та експлуатації фотоелектричних перетворювачів

Під час установки фотоелектричних станцій (ФЕС) важливо дотримуватися заходів безпеки. Серед них:

Належна кваліфікація персоналу. Лише інженери із сервісної служби мають право проведення монтажних та пусконаладжувальних робіт на фотоелектричних установках.

Електрична безпека. Перед початком будь-яких робіт переконайтеся, що ФЕС належним чином відключена від джерела живлення.

Захист від падіння. Необхідно дотримуватися відповідних заходів безпеки від падіння при роботі на висоті, яка передбачається при монтажі

несучих конструкцій і фотомодулів на поверхні даху. Обов'язковим є використання систем безпеки від падіння, таких як страхувальні ремені, бар'єри тощо.

Поводження з фотоелектричними модулями. Важливо обережно поводитися з фотоелектричними модулями при їх перенесенні і закріпленні на несучих конструкціях. Слід оберігати модулі від пошкоджень шляхом використання спеціальних пристосувань для транспортування фотомодулів та підйому їх на висоту.

Електричні підключення. Слід використовувати лише електроізолювані інструменти та правильне заземлення, щоб мінімізувати ризик ураження струмом або короткого замикання. Електричне підключення може виконуватись тільки кваліфікованим електриком. Для безпечної роботи з електротехнічною частиною даного проекту необхідно дотримуватися вимог ДНАОП 1.1.10-1.07-01 «Правила експлуатації електрозахисних засобів» [23], а також ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів і вимог безпеки «Правил улаштування електроустановок» [24]. Це дозволить уникнути виробничих травм в процесі монтажних, пусконаладжувальних та експлуатаційних робіт.

Пожежна безпека. Необхідно також вжити заходів для запобігання виникненню пожежі, яку створюють матеріали, придатні для горіння, серед яких: паперова та полівінілхлоридна ізоляція кабелів, фарба корпусів, теплоізолюючі матеріали. Пожежа може виникнути через коротке замикання, несправність електроустаткування, струмові перевантаження, нехтування правилами пожежної безпеки при експлуатації устаткування.

У зв'язку з цим в технічному приміщенні необхідно передбачити засоби пожежогасіння та автоматичну пожежну і охоронну сигналізацію. Також рекомендуються наступні профілактичні заходи пожежної безпеки:

- підтримання справності захисного відключення установки від мережі.
- дотримання персоналом правил пожежної безпеки.

Особистий захист. Інженери сервісної служби повинні бути забезпечені усіма необхідними елементами одягу, індивідуального захисту, такими як окуляри, рукавички, каски та захисне взуття, для захисту від можливих небезпек під час монтажу.

Тренінг та документація. Переконайтеся, що всі працівники, задіяні у монтажі, отримали належну підготовку з питань безпеки та інструкції щодо використання обладнання. Зберігайте записи про проведений тренінг, дозволи, інспекції та будь-які зміни, зроблені під час монтажу.

Погодні умови. Під час монтажу дахових фотоелектростанцій необхідно враховувати погодні умови. Слід уникати роботи в екстремальних погодних умовах, таких як сильний вітер або дощ, які можуть створити додаткові ризики для інженерів сервісної служби.

4.3 Охорона навколишнього середовища

Впровадження системи опалення на основі теплового насоса і фотоелектростанції має позитивний вплив на навколишнє середовище. Це пояснюється тим, що за рахунок використання енергії сонячного випромінювання скорочується використання викопного палива, що зменшує викиди парникових газів в атмосферу планети. Також за рахунок використання екологічно чистих матеріалів зменшується негативний вплив на стан навколишнього середовища

- Шумове забруднення

Оскільки система опалення на основі теплового насоса та фотоелектростанції встановлюється в межах приватного домогосподарства, слід звернути особливу увагу на фактор шумового забруднення

навколишнього середовища. Теплообмінник зовнішнього блоку теплового насоса продукує низькочастотні шуми в процесі експлуатації. Для їх мінімізації необхідно встановити тепловий насос на віброопорах, які запобігатимуть передачі вібрацій від теплового насоса до твердої поверхні, на якій він встановлений. Внутрішній блок теплового насоса необхідно встановити на відстані не менше 300 мм від найближчих стін, на твердій поверхні також із застосуванням віброопор. У приміщенні, де встановлено внутрішній блок теплового насоса необхідно встановити додаткову шумоізоляцію для зменшення передачі низькочастотних коливань в інші кімнати приміщення. Обладнання фотоелектростанції не створює шумів, які можуть мати негативний вплив на довкілля.

- Клімат та мікроклімат

Встановлення системи опалення на основі теплового насоса та фотоелектростанції не впливає на мікроклімат навколишнього середовища, оскільки тепла потужність, яка відбирається тепловим насосом з навколишнього середовища, повертається у довкілля через теплові втрати будинку. Фотоелектростанція не спричиняє локальних змін мікроклімату, оскільки встановлена на даху житлового будинку, а тому не створює додаткового затінення.

- Геологічне середовище

Встановлення системи опалення на основі теплового насоса та фотоелектростанції не передбачає негативного впливу на геологію навколишнього середовища за умови використання теплового насоса, джерелом низькотемпературної енергії якого є повітря. Оскільки монтажні роботи для цього типу установки не передбачають земляних робіт із встановлення підземного теплообмінного контуру. Встановлення фотоелектростанції також не зумовлює негативних наслідків для ґрунтового покриву, оскільки відсутні будь-які земляні роботи.

Фотоелектрична станція, як складова частина системи опалення, не спричиняє шкоди геологічному середовищу, оскільки не продукує забруднюючих речовин під час експлуатації. Також вона не займає корисної площі землі, оскільки змонтована на даху житлового будинку.

- Навколишнє повітря

Під час монтажу та експлуатації теплового насоса можливий витік фторовмісних парникових газів, які мають негативний вплив на атмосферу планети і прискорюють глобальне потепління. Для запобігання витоків фторовмісних газів необхідно допускати до монтажних та пусконаладжувальних робіт лише сервісних інженерів із відповідною кваліфікацією.

Висновки до розділу 4

1. У даному розділі наведено перелік основних заходів з охорони праці при монтажі та експлуатації складових системи опалення на основі теплового насоса та фотоелектростанції, а саме: організація безпеки робіт при монтажі теплового насоса та фотоелектростанції, вимоги до роботи з холодильним обладнанням та електричним устаткуванням, заходи щодо запобігання потрапляння забруднюючих речовин у навколишнє середовище, а також виникнення пожеж чи уражень електричним струмом, наведено вимоги до зберігання, обслуговування та використання обладнання для системи опалення на основі теплового насоса та фотоелектростанції, вимоги до профілактичних заходів, планування та проведення ремонтних робіт.
2. Система опалення на основі теплового насоса та фотоелектростанції продукує незначене шумове забруднення навколишнього середовища за рахунок виникнення низькочастотних коливань в результаті роботи компресора. З метою зменшення шумового забруднення при монтажу теплового насоса передбачається встановлення віброопор для запобігання передачі коливань від теплового насоса до опорної поверхні, на якому він

встановлений, а також додаткова шумоізоляція приміщення, де встановлено внутрішній блок теплового насоса.

3. Мікроклімат у місці встановлення системи опалення на основі теплового насоса та фотоелектростанції не зазнає ніяких змін, оскільки тепла енергія, яка відбирається з навколишнього середовища, є незначною і повертається через теплові втрати будинку.

4. Встановлення системи опалення на основі теплового насоса та фотоелектростанції не спричиняє негативного впливу на геологічне середовище, оскільки джерелом низькотемпературної теплової енергії для теплового насоса є повітря, а не ґрунт, тому відсутня необхідність земляних робіт із встановлення підземного теплообмінного контуру.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської дисертації було вирішено наукове завдання вдосконалення математичної моделі системи опалення приватного будинку на основі теплового насоса та фотоелектростанції та визначення співвідношень енергетичних показників складових частин установки.

1. Проведено аналіз поточного стану розвитку систем опалення приватних домогосподарств на основі теплових насосів та потенціалу їх подальшого розвитку в Україні та в країнах Європейського Союзу. Встановлено основні перешкоди на шляху подальшого розвитку галузі теплових насосів, а також нормативні акти, які встановлюють подальші шляхи розвитку індустрії. Представлено базову інформацію про типи та конструкцію теплових насосів.

2. Вдосконалено математичну модель системи опалення приватного будинку на основі теплового насоса та фотоелектростанції за рахунок реалізації в межах системи опалення чотирьох різних алгоритмів експлуатації з різними початковими налаштуваннями, що дозволило промодельовати роботу системи опалення та встановити енергетичні співвідношення різних складових системи протягом чотирьох сезонів експлуатації, а саме: графіки зміни температури повітря в будинку, графіки зміни температури води в накопичувальній ємності, об'єм накопичувальної ємності, необхідний для забезпечення потреб споживача при різних алгоритмах функціонування, вартість забезпечення опалення та гарячого водопостачання для кожного алгоритму функціонування, а також коефіцієнт забезпеченості електричною енергією, що характеризує частку покриття енергетичних потреб системи опалення за рахунок фотоелектростанції.

3. Встановлено, що реакційний алгоритм функціонування системи опалення, що передбачає використання теплового насоса із номінальною

потужністю 5,2кВт із живленням від фотоелектростанції та мережі, дозволяє знизити експлуатаційні витрати на 50% порівняно із базовим алгоритмом експлуатації, при якому використовується електричний водонагрівач потужністю 4 кВт із живленням від мережі. Також при реакційному алгоритмі експлуатації коефіцієнт забезпеченості електроенергією сягає 36% влітку і до 23% восени та навесні. У базовому та реакційному алгоритмах об'єм бака-акумулятора для накопичення гарячої води становив 200 літрів. Цього було достатньо для забезпечення потреб споживача протягом доби із підтриманням температури води в баку в межах 43°...50°C.

4. Економічний алгоритм, який передбачав використання теплового насоса із живленням від мережі, у нічний період, дозволив досягти зниження експлуатаційних витрат на 20...40% порівняно із базовим алгоритмом. Проте такого ефекту вдалося досягнути шляхом збільшення ємності бака-акумулятора гарячої води з 0,2 м³ до 1,5 м³, 0,8 м³, 1,5 м³ та 2 м³ для весни, літа, осені та зими відповідно. Це зумовлено необхідністю накопичення теплової енергії протягом нічного періоду роботи теплового насоса для подальшого використання цієї енергії вдень.

5. Автономний алгоритм функціонування, що передбачає використання теплового насоса із живленням від фотоелектростанції у денний період доби, показав найнижчі показники експлуатаційних витрат. Порівняно з реакційним алгоритмом, вартість затраченої електроенергії знизилась на 10%. При цьому об'єм бака-акумулятора гарячої води збільшився з 0,2 м³ до 0,4 м³, 0,4 м³, 0,4 м³ та 0,8 м³ для весни, літа, осені та зими відповідно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gaur A. S., Fitiwi D. Z., Curtis J. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*. 2021. Vol. 71. P. 101764. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764>.
2. М. О. Шульга, І. Л. Деркач, О. О. Алексахін. Інженерне обладнання населених місць: Підручник. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 259 с.
3. Соціально-демографічні характеристики домогосподарств України (за матеріалами вибіркового обстеження). Київ: Держ. служба статистики України, 2021. 89 с.
4. Протокол засідання Європейської комісії від 16 лютого 2016 року. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/en/memo_16_311/MEMO_16_311_EN.pdf
5. 2010/31/EU. DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Effective from 2010-07-08. Official edition. Strasbourg: Official Journal of the European Union, 2010. 35 p.
6. Jackman J. Which countries are winning the european heat pump race? *Eco experts*. 2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.theecoexperts.co.uk/heat-pumps/top-countries>.
7. EU number of households by country 2021 | Statista. *Statista*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.statista.com/statistics/868008/number-of-private-households-in-the-eu/> (date of access: 06.02.2023).
8. Kurmayer N. J. Europe's booming demand for heat pumps exposes bottlenecks. *www.euractiv.com*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/europes-booming-demand-for-heat-pumps-exposes-bottlenecks/> (date of access: 08.02.2023).

9. Honoré, A. (2018). How much (and what sort of) energy is used for heating and cooling in Europe? In *Decarbonisation of heat in Europe: implications for natural gas demand* (pp. 12–22). Oxford Institute for Energy Studies. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.jstor.org/stable/resrep30979.8>.
10. «Фотоенергетика». Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи для студентів за спеціальністю 7/8.05070107 "Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії" /укл. О.Ю. Гаєвський – К.: ФЕА НТУУ «КПІ», 2016. – 32с.
11. Українська ССР. Частина 1-6. Багаторічні дані. Ленінград: Гидрометеоиздат, 1990. 605 с.
12. JA Solar PV module. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.jasolar.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=453>
13. Гібридний інвертор Ахіома Energy ISMPPT BFP 8000. *E-energy*. Електронний ресурс. Режим доступу: https://e-energy.in.ua/solar_inverters/gibridnij-invertor-axioma-energy-ismppt-bfp-8000.html (дата звернення: 08.02.2023).
14. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal processes 2nd edition. 2nd ed. New York, NY : Wiley, 1991. 928 p.
15. Jordan U., Vajen K. DHWcalc: program to generate domestic hot water profiles with statistical means for user defined conditions. 2005. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/237651871_DHWcalc_PROGRAM_TO_GENERATE_DOMESTIC_HOT_WATER_PROFILES_WITH_STATISTICAL_MEANS_FOR_USER_DEFINED_CONDITIONS.
16. Погодинні ціни купівлі-продажу електроенергії. *Оператор ринку*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.oree.com.ua/index.php/pricestr> (дата звернення: 21.03.2023).

17. ДБН В.2.6-31:2021. ТЕПЛОВА ІЗОЛЯЦІЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ БУДІВЕЛЬ. На заміну ДБН В.2.6-31:2016 Мінрегіон; чинний від 2021-12-30. Вид. офіц. Київ: М-во розвитку громад та територій України, 2022. 23 с.
18. Mitsubishi Electric Ecodan Data Book | PDF | Heat Pump | Air Conditioning. [Електронний ресурс]. Режим доступу: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.Mitsubishi-les.info/database/servicemanual/files/201803_ATW_DATABOOK.pdf (date of access: 11.03.2023).
19. EN 14511-1;EN 14511-2;EN 14511-3;EN 14511-4. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling. Effective from 2005-07-01. Official edition. 2005.
20. Karlsson F., Fahlén P. Capacity-controlled ground source heat pumps in hydronic heating systems. *International Journal of Refrigeration*. 2007. Vol. 30, no. 2. P. 221–229. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.08.008> (date of access: 17.05.2023).
21. Cabrol L., Rowley P. Towards low carbon homes – A simulation analysis of building-integrated air-source heat pump systems. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 48. P. 127–136. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.019>.
22. Reindl D. T., Beckman W. A., Duffie J. A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*. 1990. Vol. 45, no. 1. P. 9–17. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(90\)90061-g](https://doi.org/10.1016/0038-092x(90)90061-g).
23. ДНАОП 1.1.10-1.07-01. ДНАОП 1.1.10-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів (30052). На заміну НАОП 1.1.10-1.07-82 ; чинний від 2001-06-05. Вид. Офіц, Київ. ДЕРЖ. ДЕПАРТАМЕНТ З НАГЛЯДУ ЗА ОХОРО. ПР. М-ВА ПР. ТА СОЦ. ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ, 2001. 103 с.
24. ДНАОП 0.00–1.21–98. ДНАОП 0.00–1.21–98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (33105). На заміну ДНАОП

0.00.1.21-84; чинний від 1998-02-20. Вид. офіц. Київ: Держ. ком. України по нагляду за охорон. пр., 1998. 103 с.

Додаток А

Таблиця 1 – Технічні характеристики фотомодуля

JA Solar JAM54D40-410DB		
Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Пікова потужність (STC)	Вт	410
Напруга холостого ходу	В	37,82
Напруга ММР	В	31,37
Струм короткого замикання	А	13,95
Струм ММР	А	13,07
Максимальна напруга системи	В	1500
Коефіцієнт корисної дії	%	21
Температурний коефіцієнт потужності	%/°C	-0,30
Розміри (довжина x ширина x товщина)	мм	1722×1134×30
Маса	кг	21.5
Діапазон робочих температур	°C	-40...+85

Таблиця 2 – Характеристики інвертора

AXIOMA Energy ISMPPT BFP 8000		
Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Номінальна потужність	кВт	8
Максимальна вхідна напруга фотомодулів	В	500
Максимальний вхідний струм фотомодулів	А	2x18
Діапазон відслідковування ММР	В	90...455
Діапазон вихідної напруги АС	В	170...280
ККД	%	93

Додаток Б

Таблиця 3 – Геометричні параметри будівлі

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Довжина	м	8,6
Ширина	м	7
Висота	м	3
Кут нахилу даху	°С	30
Кількість вікон	шт	6
Висота вікна	м	1,2
Ширина вікна	м	1
Товщина цегли	м	0,48
Товщина утеплювача (скловата)	м	0,25
Товщина склопакету	м	0,032
Товщина покрівлі	м	0,005

Таблиця 4 – Теплофізичні характеристики матеріалів

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Коеф. теплопровідності цегли	Вт/м · °С	0,85
Коеф. теплопровідності утеплювача	Вт/м · °С	0,04
Коеф. теплопровідності покрівлі	Вт/м · °С	0,8
Коеф. теплопровідності склопакету	Вт/м · °С	0,8

Додаток В

Код програми для реалізації схеми математичної моделі у середовищі
SIMULINK.

```

clc
clear all
close all

%Time is given in units of hours
% -----
%PV generation
PV_eff = 0.215;
INV_eff = 0.93; %PV and inverter efficiency
A_pan = 1.95;
N_pan = 14; %PV area and quantity
Derat = -0.003; %PV power derating
NOCT = 25; %deg. Normal operating cell temperature
% -----

% convert radians to degrees
r2d = 180/pi;
% -----
% Define the house geometry
% -----
lenHouse = 8.6; % House length
widHouse = 7; % House width
htHouse = 3; % House height
pitRoof = 30/r2d; % Roof pitch
numWindows = 6; % Number of windows
htWindows = 1.2; % Height of windows
widWindows = 1; % Width of windows
% -----
windowArea = numWindows*htWindows*widWindows;
wallArea = 2*(lenHouse + widHouse)*htHouse - windowArea;
roofArea =
((widHouse/2*tan(pitRoof))*lenHouse)+(2*(widHouse/2*tan(pitRoof))/sin(pitRoof)*
lenHouse);

% Define the type of insulation used
% -----
% % Wall bricks
Lambda_brick = 0.85; % W/m*k
Delta_brick = 0.48; %m

% Glass wool in the walls
Lambda_wool = 0.04; % W/m*k
Delta_wool = 0.25; %m

R_1 = (Delta_brick/Lambda_brick) + (Delta_wool/Lambda_wool);

% Glass windows
Lambda_window = 0.8; % W/m*k
Delta_window = 0.032; %m

R_2 = (Delta_window/Lambda_window);

```



```

R_par = (R_1*R_2)/(R_1+R_2);

% Bitumen roof tiles, 0.005 m thick
Lambda_roof = 1.2; % W/m*k
Delta_roof = 0.005; %m

R_3 = (Delta_roof/Lambda_roof) + (Delta_wool/Lambda_wool);

Req = ((R_par*R_3)/(R_par+R_3))/3600;
%-----
% c = cp of air (273 K) = 1005.4 J/kg-K
cAir = 1005.4;
% -----
% Determine total internal air mass = M
% Density of air at sea level = 1.2250 kg/m^3
densAir = 1.2250;
mAir =
((lenHouse*widHouse*htHouse)+((widHouse/2)*tan(pitRoof)*widHouse)/2)*lenHouse
*densAir;
% -----
% TinIC = initial indoor temperature
TinIC = 20;

%-----
% Hot water storage tank: 200L cylinder diam = 0.55m height = 0.85m
d1 = 0.500; %m
d2 = 0.502; %m
d3 = 0.752; %m
H = 1; %m
%-----
% c = cp of air (273 K) = 4184 J/kg-K
cWater = 4184;
% -----
% Determine total mass of the water
% Water density = 1000 kg/m^3
densWater = 1000;
mWater = (pi*d1^2)*(1/4)*H*densWater;
% -----
% TinIW = initial water temperature
TinIW = 46.5;
%Upper and lower water temperature limits
Up_water = 3.5;
Dow_Water = -3.5;
% -----
% Electrical heater power, kW
Heater_power=4;
Heat_ex_eff=1;

```