

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

Міністерство освіти і науки України

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

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна
наукова праця на
правах рукопису

Богза Микола Сергійович

УДК 681.5:621.577.4:536.75

ДИСЕРТАЦІЯ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ АДАПТИВНОЮ СИСТЕМОЮ ПЕРЕРИВЧАСТОГО ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДИНКУ НА БАЗІ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають
посилання на відповідне джерело

_____ М. С. Богза

Науковий керівник Волощук Володимир Анатолійович, д.т.н., професор

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Богза М. С. Автоматизація процесу керування адаптивною системою переривчастого теплозабезпечення будинку із застосуванням оптимальних уставок регулятора. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

У дисертаційній роботі запропоновано подальший розвиток підходу з автоматизації процесу керування адаптивною системою переривчастого теплозабезпечення будинку на базі теплонасосної установки (ТНУ) із застосуванням оптимальних уставок регулятора. Зокрема, визначено умови формування уставки для ПІД-регулятора з урахуванням змінного графіку обігріву будівлі, динаміки теплових режимів в будівлі та зовнішніх умов, що дозволяє підвищити енергоефективність системи теплозабезпечення.

Розроблено математичну модель ТНУ, яка дає змогу досліджувати динамічні режими роботи системи теплозабезпечення під час переривчастого обігріву, зокрема при переході від нічного режиму зі зниженою уставкою до етапу ранкового розігріву, що забезпечує комфортну температуру на момент початку робочого дня. Запропоновано алгоритми оптимізації режимів роботи ТНУ, завдяки яким підвищується ефективність системи теплозабезпечення.

Також запропоновано методологію інтеграції аналітичних та нейронних моделей ТНУ в середовище MATLAB/Simulink, що дає можливість прискорити процес моделювання системи у змінних умовах експлуатації. Досліджено вплив параметрів переривчастого обігріву на коефіцієнт перетворення (COP), споживання електроенергії ТНУ та комфортні температурні умови у будівлі.

Результати дослідження демонструють, що застосування запропонованого підходу дозволяє мінімізувати споживання електроенергії ТНУ, забезпечити гнучке управління температурними режимами та оптимізувати енергоспоживання, що сприяє підвищенню загальної ефективності системи теплозабезпечення будинку.

Перший розділ документа містить детальний опис проблематики та актуальності дослідження, присвяченого автоматизованому керуванню ТНУ у системах теплозабезпечення будівель. Основний акцент зроблено на необхідності підвищення енергоефективності за рахунок удосконалення алгоритмів керування, що дозволяють оптимізувати витрати електроенергії без втрати теплового комфорту.

У вступній частині розглядається зростання попиту на енергоефективні технології в умовах глобальної тенденції до скорочення використання викопного палива. Особлива увага приділена впливу переривчастого режиму обігріву на зменшення енергоспоживання. Наголошено, що традиційні системи працюють у режимі постійного навантаження, що не завжди є доцільним, особливо в умовах змінних температурних умов та відсутності людей у будівлі в нічний час.

Далі обґрунтовується необхідність використання математичних моделей для прогнозування та керування тепловими режимами в будівлі. Описано, що використання пакету Matlab, Simulink, Simscape для моделювання дозволяє створювати динамічні моделі, які враховують зміни умов навколишнього середовища, теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій будівлі та динамічні процеси теплових режимів.

У контексті формування керуючих алгоритмів підкреслюється важливість правильного вибору уставки температури в нічний час та випереджаючого прогріву, щоб до моменту початку робочого дня забезпечити комфортний тепловий режим всередині приміщення.

Таким чином, перший розділ висвітлює основні виклики у сфері теплозабезпечення будівель, окреслює мету дослідження та обґрунтовує вибір методів та засобів для реалізації енергоефективного управління ТНУ.

Другий розділ дисертації присвячений розробці аналітичної моделі ТНУ, яка є основним інструментом для дослідження її роботи, оцінки ефективності та оптимізації режимів експлуатації. У розділі розглядаються сучасні методи моделювання ТНУ, їхні переваги та недоліки, а також визначаються ключові етапи створення аналітичної моделі.

Аналіз методів моделювання охоплює три основні підходи: аналітичні, емпіричні та гібридні моделі. Аналітичні моделі базуються на фізичних принципах, таких як закони термодинаміки, теплопередачі та гідродинаміки, що забезпечує високу точність, але вимагає значних обчислювальних ресурсів. Емпіричні моделі, побудовані на основі експериментальних даних, швидші у реалізації, але менш універсальні та менш адаптивні до змінних умов експлуатації. Гібридні моделі поєднують обидва підходи, дозволяючи отримати баланс між точністю та обчислювальною складністю, що робить їх найбільш перспективними для моделювання складних систем.

Наступна частина розділу присвячена етапам створення аналітичної моделі ТНУ. Основою для моделювання є фундаментальні фізичні закони: збереження енергії, теплопередачі, рівняння стану та гідродинаміки потоків. Розробка аналітичної моделі включає математичний опис основних компонентів ТНУ: випарника, компресора, конденсатора та розширювального вентиля. Для кожного з них формулюються рівняння енергетичних балансів з використанням функціональних залежностей які визначають теплофізичні властивості робочих тіл.

Особливу увагу приділено використанню програмного пакету CoolProp, який дозволяє точно розраховувати теплофізичні властивості робочих тіл, які використовуються в ТНУ. Інтеграція цього пакета в

MATLAB/Simulink/Simscape забезпечує високу точність розрахунків у реальному часі, що критично важливо для динамічного моделювання. Детально розглядається алгоритм використання CoolProp для визначення теплофізичних параметрів робочих середовищ у різних компонентах ТНУ.

Реалізація моделі в MATLAB включає розробку модульної структури, у якій окремі функціональні блоки описують роботу кожного елемента системи. Модель інтегрована в середовище Simulink, що дозволяє проводити симуляції динамічних режимів роботи ТНУ та аналізувати ефективність керування тепловими процесами. Для тестування та валідації використовуються експериментальні дані, що дозволяють оцінити похибку моделювання та перевірити адекватність отриманих результатів.

Окремий підрозділ присвячений валідації моделі, яка включає порівняння розрахункових значень із експериментальними даними. Аналіз похибок показує, що модель має високу точність, особливо у номінальних і часткових режимах роботи.

Висновки до розділу узагальнюють основні результати розробки аналітичної моделі ТНУ, підкреслюючи її практичну значущість для оптимізації режимів роботи такими установками. Зазначається, що модель може бути використана для розробки інтелектуальних алгоритмів керування, що дозволить підвищити енергоефективність системи. Водночас наголошується на її головному недоліку – значних обчислювальних витратах, що ускладнює використання моделі для довготривалих симуляцій. Тому в наступних дослідженнях передбачається заміна аналітичної моделі на модель машинного навчання.

Третій розділ дисертації присвячений розробці та інтеграції моделі машинного навчання для ТНУ у середовище Simulink. Традиційні аналітичні моделі, незважаючи на свою точність, мають значні обмеження у швидкодії, що ускладнює їх використання для управління в реальному часі. Використання методів машинного навчання дозволяє зменшити

обчислювальну складність та адаптувати модель до змінних умов. Ця методологія поєднує точність аналітичних моделей із швидкодією нейронних мереж, що робить її перспективним підходом до керування ТНУ.

Одним із ключових етапів дослідження є вибір моделі машинного навчання. Було проведене порівняння двох підходів: алгоритму Random Forest і нейронної мережі LSTM. Алгоритм Random Forest є простішим у реалізації та менш вимогливим до даних, але він не враховує часових залежностей у роботі системи. Натомість LSTM дозволяє моделювати складні динамічні процеси та аналізувати змінні, що мають довгострокові залежності. Тестування показало, що LSTM значно перевершує Random Forest у точності прогнозування теплових режимів системи, хоча потребує більше обчислювальних ресурсів під час навчання.

Розробка нейронної моделі передбачала кілька етапів: збір і підготовка тренувальних даних, вибір архітектури нейронної мережі, її навчання та подальша інтеграція у Simulink. Було використано великий обсяг даних, отриманих із аналітичної моделі ТНУ, що містили інформацію про температурні режими у випарнику, конденсаторі, компресорі, теплове навантаження та масову витрату теплоносія. Дані були нормалізовані та структуровані для ефективного навчання моделі.

Вибір архітектури нейронної мережі зупинився на LSTM, оскільки цей тип мереж ефективно працює з часовими рядами. Модель складалася з одного прихованого шару з п'ятьма нейронами, що забезпечило баланс між швидкістю роботи та точністю прогнозування. Для запобігання перенавчанню використовувалися техніки регуляризації, зокрема ранній зупин. Оптимізація виконувалася за допомогою алгоритму Adam, а функцією втрат було обрано середньоквадратичну помилку.

Після навчання модель була конвертована у формат, придатний для використання у Simulink. Це передбачало трансформацію нейронної мережі у С-код із використанням бібліотеки `keras2c`, що дозволило отримати

компактний та швидкодіючий код. Подальша інтеграція моделі у Simulink виконувалася через S-функцію, яка забезпечила зв'язок між нейронною моделлю та моделями інших типів, створених вбудованими засобами Matlab/Simulink.

Тестування інтегрованої моделі в середовищі Simulink підтвердило її ефективність. Було проведено порівняння трьох реалізацій: вихідної моделі на Python, її еквівалента на мові C та кінцевого блоку S-функції у Simulink. Всі три варіанти показали близькі результати за точністю, що свідчить про коректність перетворення та інтеграції моделі. Водночас значно покращилася швидкість обчислень: якщо модель у Python потребувала значного часу для кожної ітерації, то реалізація у C-коді дозволила суттєво прискорити процес, а блок S-функції забезпечив можливість роботи в реальному часі.

Висновки розділу підкреслюють доцільність використання методів машинного навчання для оптимізації роботи ТНУ та синтезу систем управління. Запропонований підхід поєднує точність аналітичних моделей із продуктивністю нейронних мереж, що робить його ефективним інструментом для досліджень. Інтеграція моделі в Simulink відкриває нові можливості для оптимізації управління ТНУ, дозволяючи адаптувати систему до змінних умов експлуатації та прогнозувати її роботу з високою точністю. Майбутні дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення моделі, зокрема на її адаптацію до різних типів ТНУ та розширення можливостей керування за допомогою інтелектуальних алгоритмів.

Четвертий розділ дисертації присвячений розробці моделі системи теплозабезпечення будинку. Основною метою цього етапу є створення загальної моделі, яка об'єднує ТНУ, систему опалення та будівлю. Така модель забезпечує відтворення динаміки теплових режимів у будинку, через вплив зовнішніх факторів та роботу системи теплозабезпечення.

Також є можливість інтеграції різних алгоритмів керування та їх аналізу для оцінки ефективності та оптимізації роботи системи.

Модель враховує конструктивні особливості будівлі, теплофізичні характеристики огорожувальних конструкцій, внутрішні джерела теплоти. Використання кліматичних даних які представлені типовим метрологічним роком, дає можливість дослідити динаміку теплового режиму будівлі впродовж опалювального сезону.

Модель ТНУ реалізована на основі нейронної мережі LSTM дає можливість дослідити динаміку змін режимів роботи установки та системи теплозабезпечення загалом. Модель системи опалення побудована з урахуванням постійної витрати теплоносія та роботи за температурним графіком з метою підтримання в приміщеннях теплового комфорту.

Одним із ключових етапів дослідження є узгодження теплових режимів моделі ТНУ з моделлю будинку. Цей процес передбачає зв'язок між фізичними параметрами системи, такими як температура теплоносія, теплове навантаження та зовнішні кліматичні умови. Температура води на виході з ТНУ та її масова витрата виступають вхідними параметрами для моделі будинку, яка, у свою чергу, генерує сигнал зворотного зв'язку для регулювання режиму роботи компресора. Таким чином, модель дає можливість дослідити взаємозв'язок між тепловим режимом будівлі та режимом роботи ТНУ, що є важливим для оцінки ефективності роботи системи та пошуку шляхів її оптимізації.

Дослідження динамічних режимів роботи системи проводиться з використанням ПІД-регулятора, який забезпечує керування температурою теплоносія на виході з ТНУ. Регулятор визначає необхідне значення температури води залежно від зовнішніх умов, дозволяючи компенсувати теплові втрати та забезпечити стабільний тепловий комфорт у будівлі. Для реалізації цього алгоритму у MATLAB Simulink розроблено та налаштовано ПІД-контролер, який динамічно регулює параметри системи у відповідь на

зміну навантаження. Результати тестування моделі підтвердили її ефективність. Виявлено, що впровадження ПІД-контролера дає можливість забезпечити точність регулювання температури, із максимальним відхиленням від уставки до $0,5^{\circ}\text{C}$, що є достатнім.

Загалом, результати моделювання підтверджують високу точність розробленої інтегрованої моделі системи теплозабезпечення будівлі на базі ТНУ. Отримані дані можуть бути використані для подальшого вдосконалення алгоритмів керування, зокрема шляхом застосування прогнозуючих моделей із застосуванням машинного навчання для прогнозування теплових режимів та адаптивного регулювання роботи ТНУ. Таким чином, проведене дослідження дає можливість розвивати інтелектуальні системи теплозабезпечення, які орієнтовані на сучасні вимоги сталого розвитку та декарбонізації[1].

П'ятий розділ дисертації присвячено розробці та дослідженню алгоритмів керування переривчастим обігрівом на базі ТНУ. Основна увага приділена розробці адаптивних методів керування, які дають можливість зменшити енергоспоживання в нічний період за рахунок зниження температурної уставки, а також забезпечити необхідний рівень комфорту в приміщеннях до початку робочого дня шляхом завчасного переходу в режим розігріву.

У розділі обґрунтовано актуальність досліджень у сфері енергоефективного управління теплозабезпеченням, зокрема враховуючи необхідність балансування між економією електроенергії та комфортом в приміщеннях. Розроблено математичні моделі для розрахунку оптимальних параметрів роботи ТНУ, що дає змогу ефективно адаптувати систему до змінних зовнішніх умов.

Передбачено використання середовища моделювання MATLAB/Simulink для моделювання системи теплозабезпечення будинку з ТНУ. Використано модель будівлі з її теплофізичними характеристиками,

модель ТНУ та алгоритм керування температурним режимом. Проведено численні сценарії моделювання для аналізу впливу температури нічної уставки та часу початку розігріву на загальне енергоспоживання та комфортні умови в будівлі.

Результати досліджень показали значний потенціал переривчастого керування. Зокрема, оптимальні параметри керування, визначені для різних температур зовнішнього середовища, дають можливість досягти суттєвої економії енергії без погіршення теплового комфорту у приміщеннях. Аналіз показує, що із зростанням температури навколишнього середовища необхідний час розігріву зменшується, а температура нічної уставки може бути знижена без негативних наслідків для комфорту.

Розроблено алгоритм переривчастого керування, що включає блоки збору даних, розрахунку оптимальних параметрів, адаптивного управління режимами роботи ТНУ та аналізу ефективності. Алгоритм реалізовано в MATLAB/Simulink, а результати моделювання свідчать про можливість зниження енергоспоживання системи до 18% у порівнянні з традиційними методами безперервного керування.

У фінальній частині розділу представлено порівняльний аналіз ефективності безперервного та переривчастого режимів роботи ТНУ. Виявлено, що при переривчастому управлінні середня температура в приміщенні залишається в допустимих межах, а середня температура теплоносія зменшується, що знижує навантаження на обладнання та подовжує термін його служби. Таким чином, запропоновані алгоритми управління є ефективним рішенням для оптимізації енергоспоживання ТНУ у системах теплозабезпечення будівель.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційної роботи заключається в наступному: виявлено і кількісно оцінено оптимальні значення параметрів переривчастого обігріву будинку на базі ТНУ, які забезпечують підвищення енергетичної ефективності системи керування

теплозабезпеченням; вдосконалено систему керування переривчастим обігрівом теплозабезпечення будинку на базі ТНУ, яка враховує вплив температури зовнішнього середовища, прямої води в умовах зниженого теплового навантаження, прямої води в умовах розігріву, а також часу розігріву і дає можливість знизити споживання електроенергії ТНУ; удосконалено підходи до інтеграції аналітичних та нейронних моделей у середовищі MATLAB/Simulink за рахунок розроблення спеціальних алгоритмів, що суттєво зменшило затрати машинного часу для імітаційного моделювання динамічних процесів у системах теплозабезпечення; набули подальшого розвитку підходи до дослідження впливу типу робочого тіла на характеристики ТНУ за рахунок інтеграції бібліотек з дослідження властивостей робочих тіл в моделі ТНУ, що дало можливість оцінювати ефективність застосування нових типів робочих тіл (зокрема сумішей) на динамічну характеристики ТНУ.

Отримані результати дисертаційної роботи мають і практичне значення, яке полягає в розробленні методики інтеграції складових системи теплозабезпечення — ТНУ, системи опалення та будівлі — в єдину комплексну модель; методики розробки нейронної моделі ТНУ, яка зберігає точність аналітичної моделі та при цьому істотно скорочує час обчислень, що дає можливість ефективно застосовувати її для динамічного керування системою теплозабезпечення; розроблені алгоритму переривчастого керування режимами роботи ТНУ, який мінімізує енерговитрати та забезпечує комфортний тепловий режим у будівлі.

Разом з цим результати роботи використовуються в навчальному процесі кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Це підтверджується відповідним чином оформленим актом (додаток Б).

Ключові слова: Теплонасосна установка, автоматизація, системи керування, адаптивне керування, оптимальне керування, математичне моделювання, нейронні мережі, машинне навчання, енергоефективність, прогнозування.

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Богза М.С., Волощук В.А., Некрашевич О.В., Гікало П.В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «повітря-вода» // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – №3, том 34, 2023. – С. 36-44. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
2. Богза М.С., Волощук В.А., Некрашевич О.В., Гікало П.В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «вода-вода» // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – №6, том 34, 2023. – С. 184-192. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.6/27.
3. Богза М.С., Волощук В.А. Застосування методів машинного навчання у задачах моделювання динаміки теплонасосних установок // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2024. – Т.35(74), №4. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.4/09.
4. Богза М.С., Волощук В.А. Розробка та інтеграція моделі теплового насоса на основі нейронної мережі в середовище Simulink для моделювання системи опалення будинку // «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів». – №4, том 16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i4.2884>

Список публікацій здобувача, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. XXI Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (23-26 квітня 2024 р., м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського), том 2, с. 18-20.
6. X Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані

технології – 2024» (16 травня 2024 р., м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського), с. 85-87.

7. XXI Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (25-28 квітня 2023 р., м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського), том 2, с. 4-5.
8. X Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Modeling, control and information technologies – 2024» (2024 р., м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського), с. 83-85.

**Список праць здобувача, які додатково відображають наукові
результати дисертації:**

9. Авторське свідоцтво на комп'ютерну програму «Ексергетичне діагностування неполадок у компонентах теплового насосу» №123490 від 05.02.2024.

ABSTRACT

Bohza, M. S. Automation of the Control Process of an Adaptive Intermittent Heating System for a House Using Optimal Controller Setpoints. – A Qualifying Scientific Work in Manuscript Form.

Dissertation for the Awarding of the Degree of Doctor of Philosophy in the Specialty 151 “Automation and Computer-Integrated Technologies”. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2025.

In this dissertation, a further development of the approach for automating the control process of an adaptive intermittent heating system for a house based on a heat pump unit (HPU) using optimal controller setpoints is proposed. In particular, the conditions for forming the setpoint for the PID controller are determined by taking into account the building’s variable heating schedule, the dynamics of the internal thermal regimes, and the external conditions. This approach increases the energy efficiency of the heating system.

A mathematical model of the HPU is developed, which enables investigation of the dynamic operating modes of the heating system during intermittent heating—specifically during the transition from a nighttime mode with a reduced setpoint to a morning preheating stage, ensuring a comfortable temperature at the start of the workday. Optimization algorithms for the operating modes of the HPU are proposed, thereby enhancing the system’s efficiency.

A methodology for integrating analytical and neural network models of the HPU within the MATLAB/Simulink environment is also proposed. This integration accelerates the modeling process under varying operating conditions. The influence of intermittent heating parameters on the coefficient of

performance (COP), the HPU's electrical consumption, and the indoor thermal comfort is investigated.

The research results demonstrate that the proposed approach minimizes the HPU's electrical consumption, provides flexible control of temperature regimes, and optimizes energy use, which collectively contribute to the overall efficiency of the building's heating system.

The first chapter provides a detailed description of the issues and relevance of the study dedicated to the automated control of the HPU in building heating systems. The primary emphasis is on the necessity to improve energy efficiency by refining control algorithms that optimize electricity consumption without compromising thermal comfort.

The introduction discusses the growing demand for energy-efficient technologies against the global trend of reducing fossil fuel usage. Special attention is paid to the effect of intermittent heating on lowering energy consumption. It is noted that traditional systems operate under a continuous load, which is not always appropriate—especially under varying temperature conditions and when buildings are unoccupied during the night.

The chapter then substantiates the need for mathematical models to forecast and control a building's thermal regimes. It explains that using MATLAB, Simulink, and Simscape enables the creation of dynamic models that account for environmental changes, the thermal characteristics of building envelopes, and the dynamics of thermal processes.

Within the context of developing control algorithms, the importance of selecting the correct nighttime temperature setpoint and implementing preheating

is highlighted, ensuring that a comfortable thermal regime is achieved by the start of the workday.

The second chapter is dedicated to the development of an analytical model of the HPU, which serves as the primary tool for investigating its operation, evaluating its efficiency, and optimizing its operating modes. This chapter reviews modern HPU modeling methods, their advantages and limitations, and outlines the key stages in creating the analytical model.

The analysis covers three primary approaches: analytical, empirical, and hybrid models.

Analytical models are based on physical principles—such as the laws of thermodynamics, heat transfer, and fluid dynamics—which provide high accuracy but demand significant computational resources.

Empirical models, built on experimental data, are faster to implement but are less universal and adaptable to changing operating conditions.

Hybrid models combine both approaches, achieving a balance between accuracy and computational complexity, making them promising for modeling complex systems.

The chapter then details the stages of creating the analytical HPU model. Fundamental physical laws (energy conservation, heat transfer, state equations, and fluid dynamics) form the basis of the modeling. The development includes a mathematical description of the main HPU components—the evaporator, compressor, condenser, and expansion valve—with energy balance equations formulated using functional dependencies that determine the thermophysical properties of the working fluids.

Special emphasis is placed on the use of the CoolProp software package, which enables accurate calculation of the thermophysical properties of the working fluids employed in the HPU. Integration of CoolProp into MATLAB/Simulink/Simscape ensures high real-time calculation accuracy, which is critical for dynamic modeling. The algorithm for using CoolProp to determine the thermophysical parameters in various HPU components is examined in detail.

Implementation in MATLAB involves developing a modular structure in which separate functional blocks describe the operation of each component. The model is integrated into Simulink, allowing for simulations of dynamic operating modes and analysis of thermal process control efficiency. Experimental data is used for testing and validation, which assesses the modeling error and confirms the adequacy of the results.

A subsection is devoted to model validation, comparing calculated values with experimental data. Error analysis indicates that the model is highly accurate, particularly under nominal and partial operating conditions.

The chapter's conclusions summarize the main results of developing the analytical HPU model, emphasizing its practical significance for optimizing operating modes. It is noted that while the model can be used to develop intelligent control algorithms to further enhance energy efficiency, its major drawback is the significant computational expense, which complicates its use in long-term simulations. Therefore, future research proposes replacing the analytical model with a machine learning model.

The third chapter focuses on the development and integration of a machine learning model for the HPU within the Simulink environment. While traditional

analytical models offer high accuracy, their speed limitations hinder real-time control. Machine learning methods reduce computational complexity and adapt the model to changing conditions. This approach combines the accuracy of analytical models with the speed of neural networks, making it a promising strategy for HPU control.

A key stage in the study is the selection of the machine learning model. A comparison was conducted between the Random Forest algorithm and the LSTM neural network. The Random Forest algorithm is simpler to implement and less data-demanding but does not account for temporal dependencies. In contrast, the LSTM network can model complex dynamic processes and analyze variables with long-term dependencies. Testing revealed that LSTM significantly outperforms Random Forest in predicting thermal regimes, although it requires greater computational resources during training.

The development of the neural model involved several steps: data collection and preparation, selection of the neural network architecture, training, and subsequent integration into Simulink. A large volume of data obtained from the analytical HPU model—encompassing temperature regimes in the evaporator, condenser, compressor, thermal load, and the mass flow rate of the heat transfer fluid—was used. The data were normalized and structured for efficient model training.

The chosen neural network architecture is based on LSTM, which effectively processes time series data. The model comprises one hidden layer with five neurons, balancing speed and prediction accuracy. Regularization techniques, such as early stopping, are employed to prevent overfitting.

Optimization is performed using the Adam algorithm, with mean squared error as the loss function.

After training, the model is converted into a format suitable for Simulink use. This involves transforming the neural network into C-code via the `keras2c` library, yielding compact, high-performance code. The model is then integrated into Simulink through an S-function, which facilitates communication between the neural model and other models developed using MATLAB/Simulink's built-in tools.

Testing in the Simulink environment confirmed the integrated model's effectiveness. A comparison among the original Python model, its C-code equivalent, and the final S-function block showed comparable accuracy across all implementations, confirming the correctness of the conversion and integration. Moreover, computational speed was significantly improved: while the Python model required substantial time per iteration, the C-code implementation greatly accelerated the process, and the S-function block enabled real-time operation.

The chapter concludes by emphasizing the feasibility of using machine learning methods to optimize HPU performance and control system synthesis. The proposed approach combines the accuracy of analytical models with the performance of neural networks, making it an effective research tool. Integration into Simulink opens new possibilities for optimizing HPU control by enabling adaptation to changing operating conditions and highly accurate system operation predictions. Future research may focus on further improving the model, particularly by adapting it to various types of HPUs and enhancing control capabilities through intelligent algorithms.

The fourth chapter is devoted to developing a model of the house heating system. The primary goal is to create a comprehensive model that integrates the HPU, the heating system, and the building. This model reproduces the dynamics of the building's thermal regimes under the influence of external factors and the operation of the heating system. It also allows for integrating various control algorithms and analyzing their efficiency to optimize system performance.

The model accounts for the building's structural features, the thermophysical characteristics of the building envelope, and internal heat sources. The use of climatic data represented by a typical meteorological year enables the study of the building's thermal dynamics throughout the heating season.

The HPU model, implemented using an LSTM neural network, facilitates the study of dynamic changes in the unit's operating modes and the overall heating system. The heating system model is designed with a constant flow of heat transfer fluid and operates according to a temperature schedule to maintain thermal comfort indoors.

A key aspect of the study is harmonizing the thermal regimes of the HPU model with that of the building model. This involves linking the system's physical parameters—such as the heat transfer fluid temperature, thermal load, and external climatic conditions. The water temperature at the HPU outlet and its mass flow rate serve as input parameters for the building model, which in turn generates a feedback signal to regulate the compressor's operating mode. This interconnected modeling enables the investigation of the relationship between the building's thermal regime and the HPU's performance, which is critical for assessing system efficiency and identifying optimization opportunities.

Dynamic operating modes of the system are studied using a PID controller that regulates the heat transfer fluid temperature at the HPU outlet. The controller determines the required water temperature based on external conditions, compensating for heat losses and ensuring stable thermal comfort. In MATLAB/Simulink, a PID controller is developed and tuned to dynamically adjust system parameters in response to load changes. Testing confirmed its effectiveness, demonstrating temperature regulation accuracy with a maximum deviation from the setpoint of 0.5°C , which is deemed acceptable.

Overall, the simulation results confirm the high accuracy of the integrated model of the building's heating system based on the HPU. The obtained data can be used to further improve control algorithms, particularly by applying predictive models with machine learning for forecasting thermal regimes and adaptive control of HPU operation. Thus, this research contributes to the development of intelligent heating systems that meet modern requirements for sustainable development and decarbonization.

The fifth chapter is dedicated to the development and investigation of control algorithms for intermittent heating based on the HPU. The primary focus is on developing adaptive control methods that reduce energy consumption during nighttime by lowering the temperature setpoint, while ensuring the necessary comfort in the premises by initiating preheating prior to the workday.

This chapter substantiates the relevance of research in energy-efficient heating control, particularly given the need to balance energy savings with indoor comfort. Mathematical models are developed to calculate the optimal operating parameters of the HPU, allowing for effective adaptation to changing external conditions.

The simulation of the building heating system with the HPU is carried out using the MATLAB/Simulink environment. The building model—encompassing its thermophysical characteristics—along with the HPU model and the temperature control algorithm, are integrated. Numerous simulation scenarios are conducted to analyze the impact of the nighttime setpoint temperature and the preheating start time on overall energy consumption and indoor comfort.

The research results indicate a significant potential for intermittent control. In particular, the optimal control parameters determined for various external temperatures enable substantial energy savings without compromising indoor thermal comfort. Analysis shows that as the ambient temperature increases, the required preheating time decreases, and the nighttime setpoint temperature can be reduced without negatively affecting comfort.

An intermittent control algorithm is developed, comprising blocks for data collection, optimal parameter calculation, adaptive control of the HPU operating modes, and efficiency analysis. The algorithm is implemented in MATLAB/Simulink, and simulation results indicate that energy consumption can be reduced by up to 18% compared to traditional continuous control methods.

The final section of the chapter presents a comparative analysis of the efficiency of continuous versus intermittent HPU operation. It is found that under intermittent control, the average indoor temperature remains within acceptable limits, while the average temperature of the heat transfer fluid decreases—reducing equipment load and extending its service life. Thus, the proposed control algorithms provide an effective solution for optimizing the HPU's energy consumption in building heating systems.

The scientific novelty of the dissertation is summarized as follows:

- Optimal values of the intermittent heating parameters for a house based on the HPU, which enhance the energy efficiency of the heating control system, have been identified and quantitatively evaluated.
- The control system for intermittent heating of a house based on the HPU has been improved by accounting for the effects of external temperature, direct water during low thermal load and preheating, as well as preheating duration, thereby reducing the HPU's energy consumption.
- Approaches to integrating analytical and neural network models within MATLAB/Simulink have been refined by developing specialized algorithms that significantly reduce computational time for simulating dynamic processes in heating systems.
- The research has further advanced methods for investigating the impact of the type of working fluid on HPU characteristics through the integration of libraries for studying working fluid properties, which allows evaluation of the effectiveness of new types of working fluids (including mixtures) on the dynamic performance of the HPU.

The practical significance of the dissertation lies in the development of a methodology for integrating the components of the heating system—the HPU, the heating system, and the building—into a single comprehensive model; a methodology for developing a neural model of the HPU that preserves the accuracy of the analytical model while significantly reducing computation time, thereby enabling its effective use for dynamic control; and the development of intermittent control algorithms for HPU operation that minimize energy consumption while ensuring a comfortable thermal regime in the building.

Furthermore, the results of the work are applied in the educational process of the Department of Automation of Energy Processes at the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, as confirmed by the appropriately formatted certification act.

Keywords: Heat pump system, automation, control systems, adaptive control, optimal control, mathematical modeling, neural networks, machine learning, energy efficiency, forecasting.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	29
ВСТУП	31
Розділ 1. Аналітичний огляд систем теплозабезпечення та методів їх управління.....	40
1.1. Сучасні тенденції у сфері теплозабезпечення	40
1.2 Особливості ТНУ у системах теплозабезпечення.....	43
1.3 Методи та засоби моделювання систем теплозабезпечення	48
1.4. Підходи до керування ТНУ.....	52
1.5 Перспективи впровадження переривчастого обігріву	58
1.6 Висновки до розділу	61
1.6.1. Сучасний стан і перспективи розвитку ТНУ	61
1.6.2. Методи моделювання та управління ТНУ	62
1.6.3 Переривчасте керування як перспективний підхід	62
1.6.4. Подальші напрями досліджень.....	63
Розділ 2. Розробка аналітичної моделі ТНУ	65
2.1. Аналіз сучасних методів моделювання ТНУ	65
2.2. Основні етапи створення аналітичної моделі ТНУ	69
2.3. Використання програмного пакету CoolProp	72
2.4. Математична модель основних компонентів ТНУ	75
2.4.1. Модель випарника	75
2.4.2. Модель компресора	76
2.4.3. Модель конденсатора	77

2.4.4. Модель дросельного вентиля	78
2.4.5. Інтеграція компонентів у загальну модель	78
2.5. Реалізація моделі в середовищі MATLAB	79
2.5.1. Основні етапи реалізації моделі	79
2.5.2. Реалізація моделі.....	80
2.5.3. Результати моделювання	81
2.6. Результати валідації аналітичної моделі	82
2.6.1. Методологія валідації.....	82
2.6.4. Аналіз похибок.....	83
2.7. Висновки до розділу	85
2.7.1 Основні результати.....	85
2.7.2 Практичне значення.....	86
2.7.3 Рекомендації для подальшого розвитку	87
2.7.4 Ключовий недолік моделі	88
Розділ 3. Розробка та інтеграція моделі машинного навчання ТНУ в середовище Simulink.....	92
3.1 Постановка завдання	92
3.2 Порівняння Random Forest та нейронної мережі LSTM	96
3.2.1 Методологія порівняння	96
3.2.2 Характеристика Random Forest	97
3.2.3 Характеристика LSTM	98
3.2.4 Результати порівняння	99
3.2.5 Висновок	100
3.3 Розробка нейронної моделі ТНУ	101

3.3.1 Підготовка даних	101
3.3.2 Вибір архітектури нейронної мережі.....	102
3.3.3 Тренування моделі.....	103
3.3.4 Інтеграція в Simulink	105
3.4 Висновки до розділу	111
Розділ 4. Модель системи теплозабезпечення будинку із використанням ТНУ.....	113
4.1 Постановка завдання	113
4.2 Моделювання теплових режимів в будинку	116
4.3 Інтеграція моделі ТНУ з моделлю будинку	125
4.4 Дослідження динамічних режимів роботи системи.....	129
4.5 Висновки до розділу	133
Розділ 5. Розробка та дослідження алгоритмів керування переривчастим обігрівом на базі ТНУ.....	135
5.1 Методологія дослідження	137
5.1.1 Підхід до проведення досліджень.....	137
5.1.2 Алгоритм дослідження.....	138
5.1.3 Висновки до методології.....	139
5.2 Експериментальне дослідження впливу температурних режимів на енергоспоживання системи.....	139
5.2.1 Результати досліджень при температурі -10°C	139
5.2.2 Результати досліджень при температурі -5°C	141
5.2.3 Результати досліджень при температурі 0°C.....	142
5.2.4 Результати досліджень при температурі +3°C	144

5.2.5 Узагальнення результатів експериментальних досліджень	146
5.3 Розробка та реалізація алгоритму переривчастого керування	148
5.3.1 Структура алгоритму керування	148
5.3.2 Визначення оптимальних параметрів режиму	149
5.3.3 Реалізація алгоритму керування	151
5.3.4 Результати впровадження	153
5.4 Висновки до розділу	156
ВИСНОВКИ	158
1. Аналіз сучасних методів управління та моделювання ТНУ	158
2. Розробка аналітичної моделі ТНУ	158
3. Розробка та інтеграція моделі машинного навчання ТНУ	159
4. Розробка моделі системи теплозабезпечення будинку	159
5. Оптимізація керування ТНУ з використанням адаптивних алгоритмів	160
6. Практичне значення та впровадження результатів	160
Перспективи подальших досліджень	161
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	162
ДОДАТКИ	171
ДОДАТОК А	171
ДОДАТОК Б	172

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТНУ - теплонасосна установка

ІННМ - штучна нейронна мережа

COP (Coefficient of Performance) – коефіцієнт перетворення
теплонасосної установки

PID-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

MPC (Model Predictive Control) – модельно-прогнозуюче керування

LSTM (Long Short-Term Memory) – довготривала короткочасна пам'ять,
архітектура нейронної мережі

MATLAB/Simulink – програмне середовище для моделювання та
симуляції динамічних систем

CoolProp – бібліотека для розрахунку термодинамічних властивостей
робочих тіл

S-функція (S-function) – користувацька функція для розширення
можливостей Simulink

MSE (Mean Squared Error) – середньоквадратична помилка

Random Forest – алгоритм машинного навчання на основі ансамблю дерев
рішень

GridSearchCV – метод оптимізації гіперпараметрів моделі машинного
навчання

ON/OFF-регулювання – метод керування, який працює за принципом
увімкнення/вимкнення

Simscape – бібліотека MATLAB для фізичного моделювання

S-function MEX – спосіб інтеграції C-коду в Simulink через механізм
MEX-файлів

IWEC (International Weather for Energy Calculations) – міжнародні
погодні файли для енергетичних розрахунків

nZEB (Nearly Zero Energy Building) – будівлі з майже нульовим
енергоспоживанням

DOE-2, BLAST – програмні продукти для енергетичного моделювання будівель

FEM (Finite Element Method) – метод скінченних елементів

FVM (Finite Volume Method) – метод скінченних об'ємів

EnergyPlus – програмне забезпечення для енергетичного аналізу будівель

DesignBuilder – графічний редактор для створення геометрії будівлі у EnergyPlus

HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) – система опалення, вентиляції та кондиціонування

DOE (Department of Energy, USA) – Міністерство енергетики США, яке розробило EnergyPlus

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Актуальність питань енергоефективності в сучасних умовах постійно зростає через збільшення вартості енергоносіїв, обмеженість природних ресурсів, а також екологічні виклики, пов'язані з викидами парникових газів. Будівлі залишаються одним із найбільших споживачів теплової енергії: на обігрів та кондиціонування в багатьох країнах припадає щонайменше 40% загальних енерговитрат. З огляду на це, вдосконалення систем опалення, вентиляції та кондиціонування (ОВіК), зокрема із застосуванням ТНУ, є визначальним чинником підвищення загальної енергоефективності[2], [3], [4].

ТНУ, як один із найбільш перспективних напрямів у галузі відновлюваної енергетики, забезпечують можливість значного зниження споживання паливно-енергетичних ресурсів і сприяють переходу до більш чистих технологій теплопостачання. Утім, самі по собі ТНУ не гарантують оптимальної ефективності, якщо їхня робота не скоординована зі змінними умовами експлуатації та коливаннями теплового навантаження. Тому важливим є розроблення системи керування, що дає змогу в режимі реального часу адаптувати режими роботи ТНУ до зовнішніх факторів (зокрема зміни погоди та графіка використання будівлі) та внутрішніх змін (специфіка теплофізичних властивостей самого об'єкта)[5], [6].

Завдяки впровадженню адаптивної системи керування відбувається оптимізація витрат електроенергії при збереженні комфортного теплового режиму протягом доби. Особливого значення це набуває для комерційних та адміністративних будівель з фіксованим робочим графіком: коли вдень необхідно підтримувати заданий температурний рівень, а в нічний період потреба в комфортній температурі знижується. Відповідно, існує

можливість переходу на знижені температурні уставки, що забезпечує суттєву економію енергії[7], [8].

Проте, просте зниження температури вночі без урахування динаміки будівлі та складних перехідних процесів може призвести до неконтрольованих втрат тепла чи, навпаки, до надмірних витрат на розігрів приміщення вранці. Окрім того, в будівлях зі значною тепловою інертністю потрібен належний розрахунок часу та потужності для відновлення комфортної температури на початок робочого дня. Таким чином, постає завдання розробити алгоритми і методи, що автоматизують процес визначення оптимальної нічної уставки температури та тривалості передпускового розігріву, орієнтуючись на гарантовану готовність будівлі до експлуатації у визначений час (наприклад, до 8:00 ранку)[9], [10], [11].

Більшість існуючих систем керування ТНУ реалізують або фіксовані графіки температурних уставок, або обмежуються лише «денним/нічним» режимом без додаткових адаптацій. Це призводить до недостатнього врахування реальних умов експлуатації, наслідком чого є невиправдані перевитрати енергії або недотримання температурного комфорту[12], [13], [14]. Саме тому розроблення багаторежимної системи, що забезпечує:

1. Номінальний режим підтримання комфорту впродовж робочих годин.
2. Знижений режим - у нічний або інший неробочий період, коли допустимий менший рівень температури.
3. Режим розігріву - короткочасне підвищення потужності перед початком робочого дня для відновлення потрібної температури.

— є актуальним з наукового та практичного погляду.

Крім того, врахування динамічних характеристик будівлі вимагає створення відповідних математичних моделей і алгоритмів, що дозволить точно розраховувати момент переходу на знижений режим, величину нічної уставки, а також час необхідного випередження для

розігріву вранці. Всі ці фактори лежать в основі адаптивної стратегії керування, яка має бути гнучкою і здатною швидко реагувати на зміни зовнішніх та внутрішніх умов[15], [16].

Така модельно-орієнтована система керування забезпечує підвищення загальної енергоефективності та продовження терміну експлуатації обладнання завдяки зменшенню частоти високонавантажених перехідних режимів. Вона також сприяє зниженню експлуатаційних витрат і відповідному скороченню викидів парникових газів. В умовах сучасних енергетичних криз та орієнтації на сталий розвиток це має стратегічне значення для галузі теплозабезпечення[17], [18], [19].

Отже, вибір теми дисертаційної роботи «Автоматизація процесу керування адаптивною системою переривчастого теплозабезпечення будинку на базі теплонасосної установки» зумовлений наступними факторами:

- Необхідність підвищення енергоефективності в системах теплозабезпечення будівель, що є ключовою задачею для економіки та екології.
- Перспективність використання теплонасосних технологій, які здатні зменшити залежність від традиційних енергоносіїв.
- Інтегрованість з концепцією розумних будівель (Smart Buildings), де гнучкість та адаптивність систем ОВК мають фундаментальне значення.
- Недостатній рівень розробки ефективних адаптивних алгоритмів керування з урахуванням різних режимів роботи протягом доби (денний, нічний, розігрів).
- Науково-практична новизна у формуванні та перевірці алгоритму, що базується на математичних моделях теплових процесів і дає змогу заздалегідь визначати оптимальні уставки та час переходу між режимами.

Таким чином, тема дослідження є актуальною й має на меті запропонувати комплексне розв'язання завдання оптимального керування ТНУ. Завдяки цьому можна досягти істотної економії енергоресурсів, підвищити надійність теплопостачання й покращити умови перебування людей у будівлі.

Мета дослідження

Підвищення енергетичної ефективності теплозабезпечення будинку шляхом удосконалення системи керування переривчастим обігрівом на базі ТНУ.

Завдання дослідження

Для досягнення вищезазначеної мети необхідно вирішити наступні завдання дослідження:

- Аналіз існуючої літератури та визначення невирішених завдань
- Розроблення та реалізація аналітичної моделі для дослідження динамічних режимів роботи ТНУ.
- Створення та реалізація на базі розробленої аналітичної моделі нейронної моделі з метою зменшення машинного часу розрахунку.
- Інтеграція нейронної моделі ТНУ в загальну модель системи теплозабезпечення будинку.
- Визначення та дослідження впливу параметрів переривчастого обігріву на енергетичну ефективність ТНУ.
- Розроблення системи керування переривчастим обігрівом з метою підвищення енергетичної ефективності ТНУ.

Об'єкт дослідження

Технологічний процес переривчастого теплозабезпечення будинку.

Предмет дослідження

Математичні моделі та системи керування переривчастим опаленням будинку на основі ТНУ, спрямовані на оптимізацію уставки для підвищення ефективності роботи, забезпечення комфортного температурного режиму та зменшення енергоспоживання.

Методи дослідження

При дослідженні системи теплозабезпечення будівлі на базі ТНУ використані методи системного аналізу для визначення основних параметрів і умов роботи системи.

Математична модель ТНУ побудована на основі фундаментальних законів теплообміну та збереження енергії. Для створення моделі застосовані методи аналітичного моделювання з врахуванням властивостей робочих тіл і характеристик процесів теплообміну.

Методи машинного навчання, зокрема нейронні мережі, використані для побудови моделі ТНУ, яка забезпечує точність і швидкодію. Імітаційне моделювання реалізоване в універсальному середовищі моделювання, що дозволяє інтегрувати різні підходи і методи для дослідження роботи системи.

Для аналізу закономірностей впливу часу доби, температури прямої води та інших параметрів застосовано методи статистичного аналізу і прогнозування, що дозволило оптимізувати режими керування ТНУ.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше виявлено і кількісно оцінено оптимальні значення параметрів переривчастого обігріву будинку на базі ТНУ, які забезпечують підвищення енергетичної ефективності системи керування теплозабезпеченням.
2. Удосконалено систему керування переривчастим обігрівом будинку на базі ТНУ, яка враховує вплив температури зовнішнього середовища, прямої води в умовах зниженого теплового

навантаження, прямої води в умовах розігріву, а також часу розігріву і дає можливість знизити споживання електроенергії ТНУ.

3. Удосконалено підходи до інтеграції аналітичних та нейронних моделей у середовищі MATLAB/Simulink за рахунок розроблення спеціальних алгоритмів, що суттєво зменшило затрати машинного часу для імітаційного моделювання динамічних процесів у системах теплозабезпечення.
4. Дістали подальшого розвитку підходи до дослідження впливу типу робочого тіла на характеристики ТНУ за рахунок інтеграції бібліотек з дослідження властивостей робочих тіл в моделі ТНУ, що дало можливість оцінювати ефективність застосування нових типів робочих тіл (зокрема сумішей) на динамічну характеристики ТНУ.

Особистий внесок здобувача

Здобувач самостійно проаналізував особливості моделювання теплових процесів у системах теплозабезпечення з використанням теплових насосів та розглянув можливості застосування методів оптимізації для підвищення енергоефективності систем опалення, враховуючи змінні режими роботи та специфіку сучасних будівель.

Здобувач сформулював мету та завдання дослідження.

В опублікованих наукових працях зі співавторами особисто здобувачу належать такі внески:

- Розроблення та інтеграція нейронної моделі ТНУу середовище MATLAB Simulink для моделювання системи опалення будівлі[20], [21], [22], [23].
- Обґрунтування доцільності застосування алгоритмів інтервального управління для оптимізації роботи ТНУ із метою зменшення споживання електроенергії під час нічного режиму.

- Розроблення та реалізація методики моделювання теплових процесів будівлі з урахуванням впливу зовнішніх факторів (температури навколишнього середовища, сонячної радіації).
- Розроблення підходів до оцінки ефективності роботи ТНУ за різними алгоритмами управління та аналіз отриманих результатів з точки зору енергозбереження та забезпечення комфортного мікроклімату в будівлі.

Апробація матеріалів дисертації

Результати досліджень дисертації висвітлювалися на наступних конференціях, конгресах, симпозіумах, семінарах і школах:

- XXI Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (23-26 квітня 2024 р., м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського), том 2, с. 18-20.
- X Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2024» (16 травня 2024 р., м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського), с. 85-87.
- XXI Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (25-28 квітня 2023 р., м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського), том 2, с. 4-5.
- X Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Modeling, control and information technologies – 2024» (2024 р., м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського), с. 83-85.

Структура дисертації

Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновку та списку використаних джерел.

Обсяг дисертації

Загальний обсяг дисертації складає 172 сторінках, з них основний текст роботи викладено на 121 сторінках друкованого тексту, у тому числі 36 рисунків, 9 таблиць та 24 формул. У списку використаних джерел представлено 87 джерел.

Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Дисертаційна робота була виконана в рамках науково-технічної роботи за державним замовленням «Розроблення інтелектуальної низькотемпературної системи теплозабезпечення будівель на базі конденсаційної модульної котельні» (наказ МОН України №1213 від 09.10.2023, державний реєстраційний номер 0123U104476).

Практичне значення отриманих результатів

Розроблена нейронна модель ТНУ, інтегрована у середовище MATLAB Simulink, дозволяє значно прискорити процес моделювання та дослідження динамічних характеристик системи теплозабезпечення будівлі.

Запропоновано алгоритм оптимізації інтервального управління, що забезпечує зменшення споживання електроенергії ТНУ під час нічного режиму, зберігаючи комфортний мікроклімат у приміщенні.

Розроблені підходи до моделювання теплових процесів будівель з урахуванням зовнішніх впливів дозволяють адаптувати систему управління для різних кліматичних умов, підвищуючи її універсальність.

Запропонована методика оцінки енергоефективності ТНУ із застосуванням інтервального управління може використовуватись для вибору оптимальних режимів роботи системи, зменшуючи витрати на енергоресурси.

Результати дослідження сприятимуть зниженню експлуатаційних витрат, покращенню показників енергоефективності та зменшенню викидів CO₂, що є актуальним для сучасних систем теплозабезпечення.

Напрацьовані матеріали використовуються в навчальному процесі кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» для навчання студентів методам моделювання та оптимізації теплових процесів.

Розділ 1. Аналітичний огляд систем теплозабезпечення та методів їх управління

1.1. Сучасні тенденції у сфері теплозабезпечення

Енергетична ефективність та скорочення викидів вуглекислого газу є одними з ключових пріоритетів сучасної енергетики. Зростання цін на енергоносії, вимоги екологічного законодавства, а також міжнародні угоди щодо боротьби зі зміною клімату стимулюють розвиток енергоефективних технологій у сфері теплопостачання. Серед цих технологій важливе місце займають ТНУ, які забезпечують ефективне використання низькопотенційної теплової енергії навколишнього середовища[24], [25].

У більшості країн світу сектор житлового та комерційного опалення становить значну частину енергоспоживання. Традиційні системи теплопостачання, що працюють на викопному паливі (газ, вугілля), супроводжуються значними викидами парникових газів і високими експлуатаційними витратами[26].

Основними викликами є:

- Зростання енергетичних витрат: Постійне підвищення цін на енергоносії вимагає впровадження більш економічних технологій.
- Екологічні обмеження: Використання викопного палива створює значне екологічне навантаження, що особливо відчутно у великих містах.
- Попит на енергоефективні рішення: Споживачі все більше прагнуть знижувати енергоспоживання та експлуатаційні витрати.

ТНУ є сучасною відповіддю на вищезазначені виклики. Вони працюють за принципом перетворення низькопотенційної енергії навколишнього середовища (грунту, води чи повітря) у високопотенційну теплову енергію, необхідну для обігріву приміщень. Завдяки цьому, коефіцієнт трансформації ТНУ (COP, Coefficient of Performance) значно

перевищує 1, що означає, що вони забезпечують значно більше теплової енергії, ніж споживають електричної (рис. 1.1). Для порівняння ефективності ТНУ з іншими технологіями доцільно використовувати наступну формулу коефіцієнта трансформації[27], [28](1.1):

$$COP = \frac{Q_{heat}}{W_{el}} \quad (1.1)$$

де:

Q_{hea} — кількість тепла, що генерується установкою, кВт * год;

W_{el} — споживана електрична потужність, кВт * год.

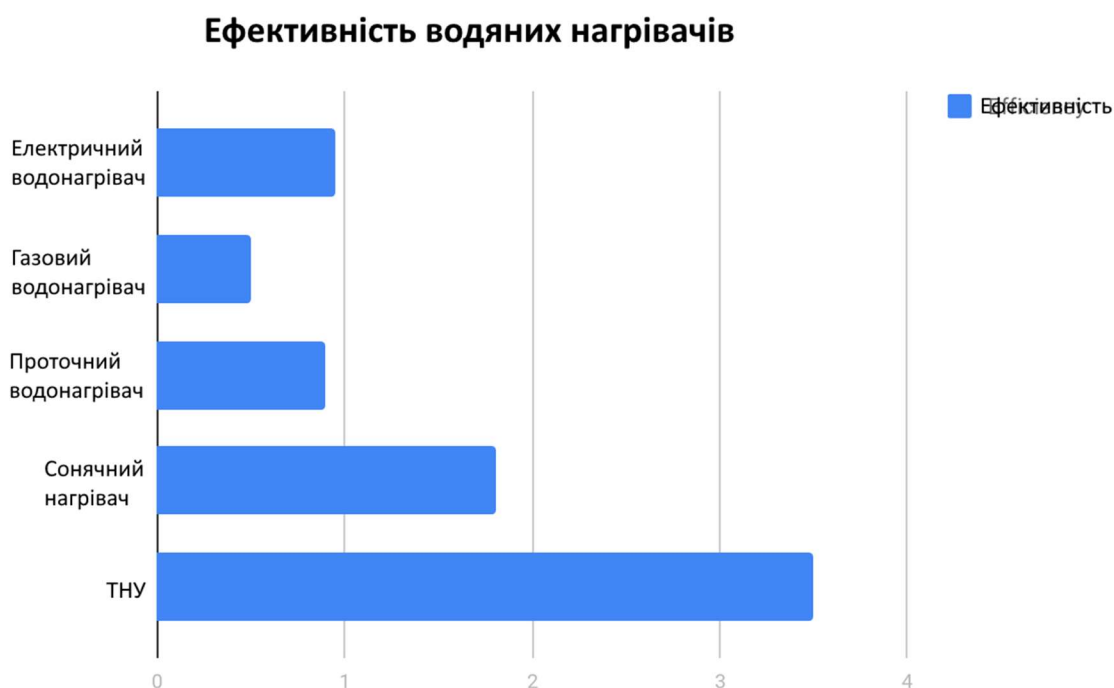


Рисунок 1.1. Графік порівняння ефективності ТНУ з іншими методами опалення[29]

Завдяки високій ефективності та можливості використовувати відновлювану енергію, ТНУ стають ключовим елементом сучасних систем теплозабезпечення.

Розвиток ТНУ активно підтримується на міжнародному рівні через впровадження стандартів енергоефективності, таких як Директива ЄС з енергетичної ефективності будівель (EPBD). У багатьох країнах існують програми субсидій на встановлення ТНУ, які стимулюють перехід на енергоощадні технології[30].

В Україні, відповідно до Державної програми енергоефективності, використання ТНУ стає дедалі популярнішим. Це пояснюється зростанням цін на газ, необхідністю зменшення залежності від імпортованих енергоресурсів та інтеграцією в міжнародну енергетичну спільноту[31].

Ще однією сучасною тенденцією є інтеграція ТНУ у «розумні» системи управління енергією, які дозволяють автоматично регулювати температуру в залежності від часу доби, присутності людей у приміщенні або змін зовнішніх умов (Рис. 1.2.). Інтервальний контроль, як один із підходів до оптимізації роботи ТНУ, дає змогу знижувати споживання енергії в нічний час і забезпечувати тепловий комфорт у години пік[32], [33].

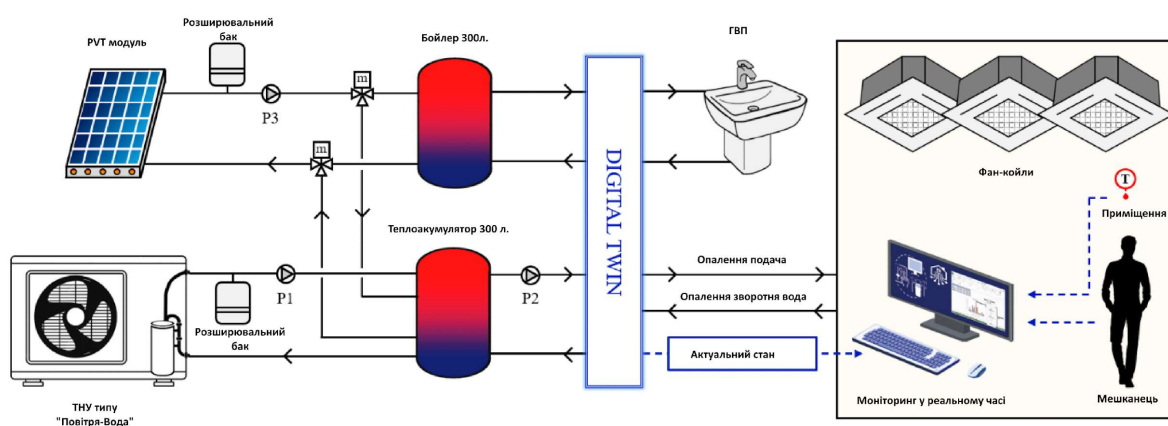


Рисунок 1.2. Схема інтеграції ТНУ у систему розумного будинку[32]

ТНУ є інноваційним рішенням у сфері теплопостачання, що дозволяє одночасно вирішувати екологічні, економічні та енергетичні виклики. Їх широке застосування є ключем до досягнення цілей сталого розвитку в

енергетиці. Завдяки впровадженню сучасних технологій управління, таких як інтервальний контроль, ТНУ забезпечують максимальну ефективність роботи систем теплозабезпечення, що робить їх основним напрямом розвитку у цій галузі.

1.2 Особливості ТНУ у системах теплозабезпечення

ТНУ є технологією, яка дозволяє ефективно використовувати низькопотенційну теплову енергію з навколишнього середовища (грунт, повітря, вода) для опалення приміщень, гарячого водопостачання або охолодження.

Основний принцип роботи ТНУ базується на використанні циклу Карно, в межах якого тепло переноситься від джерела з низькою температурою до середовища з вищою температурою (Рис. 1.3). Це досягається за рахунок роботи компресійного циклу в використання холодоагенту, що змінює свій агрегатний стан у процесі роботи[34].

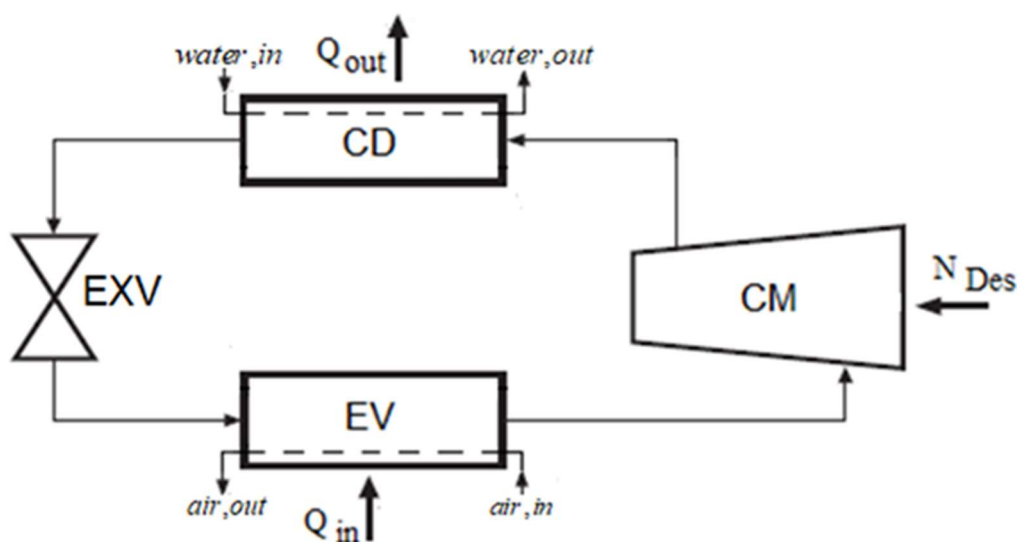


Рисунок 1.3. Схема ТНУ із зазначенням основних компонентів: компресор - CM, випарник - EV, конденсатор - CD, розширювальний клапан - EXV

Процес функціонування ТНУ складається з наступних етапів:

1. У випарнику низькопотенційне тепло передається холодоагенту, що випаровується за низького тиску.
2. Компресор стискає холодоагент, підвищуючи його температуру і тиск.
3. У конденсаторі гарячий холодоагент передає тепло системі опалення
4. Через розширювальний клапан холодоагент повертається до вихідного стану, завершуючи цикл.

ТНУ класифікуються за типом джерела тепла та середовища, до якого передається тепло. Основні типи включають:

1. Повітря-вода: Використовує теплову енергію зовнішнього повітря для нагріву води, яка циркулює у системі опалення. Цей тип характеризується простотою встановлення, але його ефективність залежить від зовнішньої температури.
2. Вода-вода: Використовує тепло підземних або поверхневих вод. Висока ефективність забезпечується стабільною температурою джерела.
3. Ґрунт-вода: Джерелом тепла є ґрунт, тепло якого поглинається через геотермальні зонди або колектори. Цей тип забезпечує стабільну ефективність протягом року, але вимагає значних капітальних вкладень для буріння свердловин.

Як показано на Рисунку 1.4, споживання ТНУ типу «повітря-вода» є вищим у обох випадках, особливо у Випадку 1, де суворіші зовнішні \ умови знижують сезонний коефіцієнт продуктивності цієї системи, що змушує використовувати модель ТНУ, здатну забезпечити необхідний потік зовнішнього повітря[35].

У Випадку 2 різниця між двома системами не настільки суттєва, оскільки кліматичні умови та геологічний контекст є м'якшими, що зменшує навантаження на систему опалення[35].

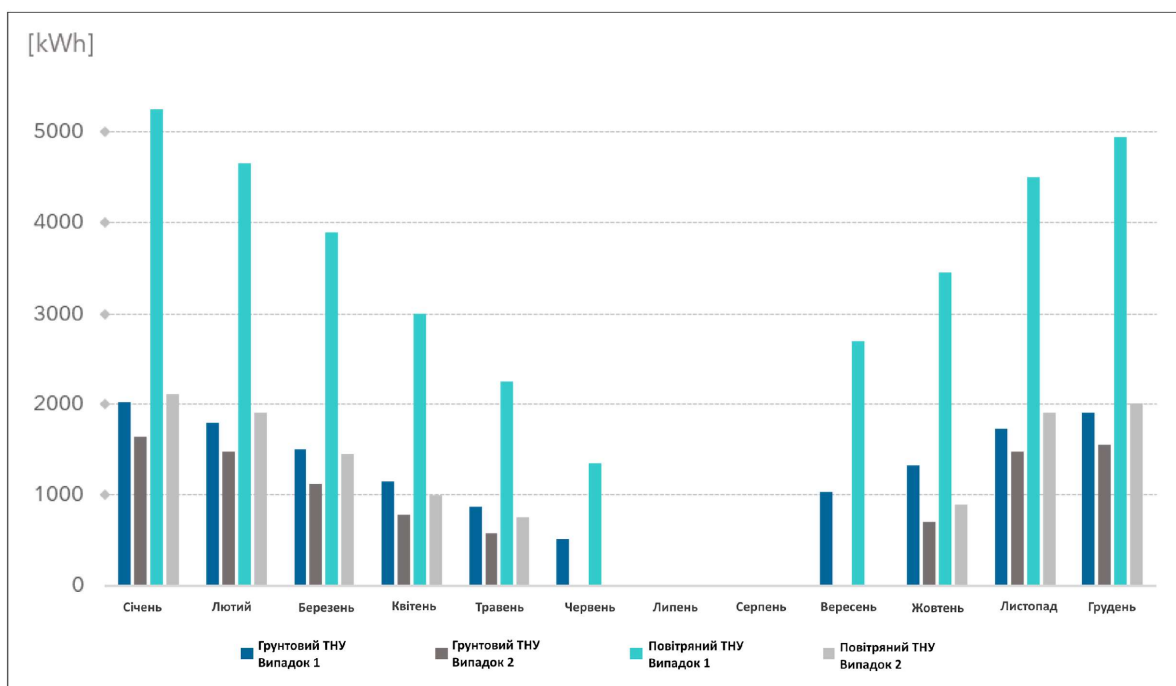


Рисунок 1.4. Графік порівняння місячного споживання різних варіантів ТНУ в різних локаціях[35]

При застосуванні ТНУ у системах теплозабезпечення важливо враховувати такі аспекти:

1. Залежність від зовнішніх умов: Наприклад, ТНУ “повітря-воді” демонструють зниження COP за низьких зовнішніх температур, що може вимагати використання додаткових джерел тепла.
2. Необхідність регулярного обслуговування: Система повинна періодично перевірятися для уникнення витоків холодоагенту та забезпечення стабільності роботи компресора.

3. Інтеграція в існуючі системи: Встановлення ТНУ може вимагати модернізації теплових мереж або встановлення буферних ємностей для зберігання теплової енергії.

Особливістю роботи ТНУ у системах теплозабезпечення є необхідність врахування динамічних змін теплового навантаження, зумовлених погодними умовами або змінним графіком споживання. Оптимальне управління ТНУ може забезпечити значну економію енергії, що особливо важливо під час нічного зниження температури або в умовах пікових навантажень.

Для опису взаємодії між температурою зовнішнього середовища і потужністю ТНУ використовується наступне рівняння (1.2) (Рис. 1.5):

$$P_{\text{ТНУ}} = f(T_{\text{зовн}}, Q_{\text{спожив}}) \quad (1.2)$$

де:

$P_{\text{ТНУ}}$ - потужність ТНУ;

$T_{\text{зовн}}$ - температура зовнішнього середовища;

$Q_{\text{спожив}}$ - теплове навантаження системи.

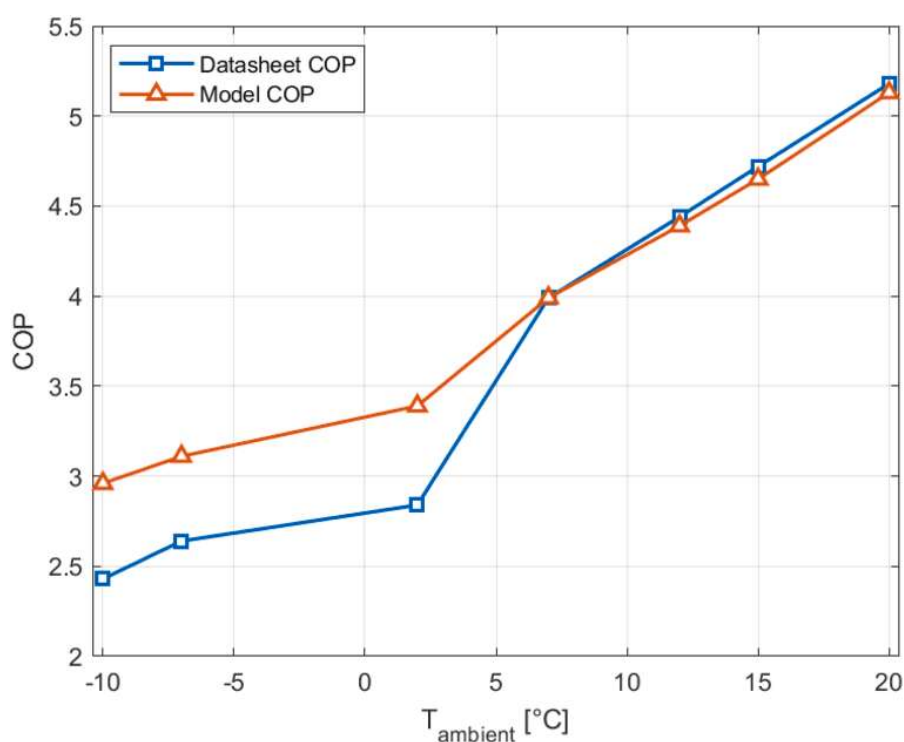


Рисунок 1.5. Графік, що ілюструє залежність COP повітряного ТНУ від температури зовнішнього середовища[36]

Основними перевагами ТНУ є:

- Висока енергоефективність та зниження експлуатаційних витрат;
- Мінімальний вплив на довкілля;
- Можливість інтеграції у розумні системи управління будівлею.

Недоліки включають:

- Висока вартість початкового встановлення, особливо типів “вода-вода” та “грунт-вода”;
- Залежність ефективності від зовнішніх умов для ТНУ типу “повітря-вода”.

ТНУ є основою сучасних енергоефективних систем теплозабезпечення. Їх висока ефективність, гнучкість і екологічність роблять їх ключовим компонентом у переході до сталих енергетичних систем. Однак для забезпечення стабільної та ефективної роботи необхідно

враховувати специфіку експлуатації кожного типу ТНУ, а також адаптувати алгоритм керування під динамічні режими роботи системи.

1.3 Методи та засоби моделювання систем теплозабезпечення

Моделювання систем теплозабезпечення є важливим етапом їх розробки, аналізу та оптимізації. Завдяки моделям можна прогнозувати поведінку системи, оцінювати ефективність різних алгоритмів управління та аналізувати вплив зовнішніх факторів. Основними підходами до моделювання теплових процесів є аналітичний, чисельний та нейромережевий.

1. Аналітичний підхід базується на математичних рівняннях теплопередачі, термодинаміки та гідродинаміки. Він дозволяє отримати точні рішення, але стає обмеженим для складних систем через нелінійності процесів та багатофакторність[37]. Основні рівняння, які використовуються в аналітичному підході, включають:

- а. Рівняння теплопередачі (1.3):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (1.3)$$

де T - температура, α - коефіцієнт провідності, ∇^2 - оператор Лапласа

- б. Баланс енергії для ТНУ (1.4):

$$Q_{\text{система}} = Q_{\text{випарник}} + W_{\text{компресор}} \quad (1.4)$$

2. Чисельний підхід базується на використанні дискретизації рівнянь, що описують теплові процеси. Найбільш поширеними методами є метод кінцевих різниць (FDM), метод кінцевих елементів (FEM) та

метод кінцевих об'ємів (FVM). Цей підхід забезпечує точність для складних систем, але потребує значних обчислювальних ресурсів[38].

3. Нейромережевий підхід застосовується для моделювання нелінійних залежностей у системах, які складно описати аналітично. Для ТНУ використовуються ШНМ, які навчаються на реальних даних і дозволяються моделювати залежності між параметрами системи[39].

MATLAB Simulink є одним із найпотужніших інструментів для моделювання динамічних систем. Його середовище дозволяє створювати моделі теплових процесів, інтегрувати фізичні компоненти та реалізовувати алгоритми управління ТНУ [40].

Основними перевагами використання Simulink є:

- Візуалізація моделі: Компоненти системи представлені у вигляді блоків, що спрощує побудову моделей.
- Інтеграція фізичних сигналів: Можливість використовувати бібліотеки, такі як Simscape, для роботи з фізичними сигналами.
- Гнучкість: Інтеграція з мовою програмування MATLAB для створення користувацьких алгоритмів.

У моделюванні ТНУ в Simulink використовується взаємодія кількох підсистем (рис. 1.6):

- Теплове навантаження будівлі: Визначає змінність теплових потреб залежно від зовнішньої температури.
- ТНУ: Модель, яка враховує всі основні компоненти ТНУ (випарник, конденсатор, компресор).
- Система управління: Алгоритм оптимального управління, наприклад, інтервального контролю.

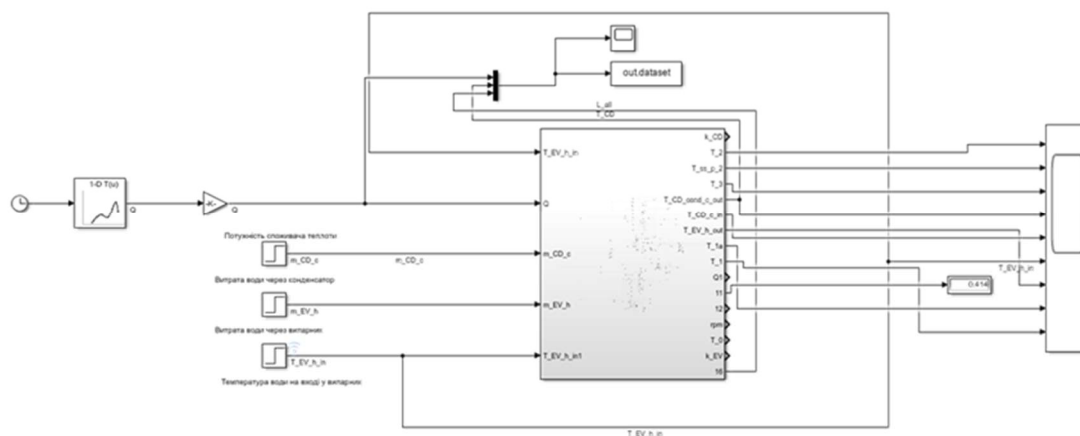


Рисунок 1.6. Схема моделі системи в середовищі MATLAB Simulink

Для точного моделювання роботи системи теплозабезпечення важливо враховувати зовнішні фактори, такі як температура зовнішнього повітря та сонячна радіація. Ці фактори впливають на теплове навантаження будівлі та ефективність ТНУ. Математично це можна описати рівнянням (1.5) (рис. 1.7):

$$Q_{\text{потреб}} = f(T_{\text{зовн}}, I_{\text{сон}}), \quad (1.5)$$

де:

$Q_{\text{потреб}}$ — потреба в теплі,

$T_{\text{зовн}}$ — температура зовнішнього середовища,

$I_{\text{сон}}$ — інтенсивність сонячного випромінювання.

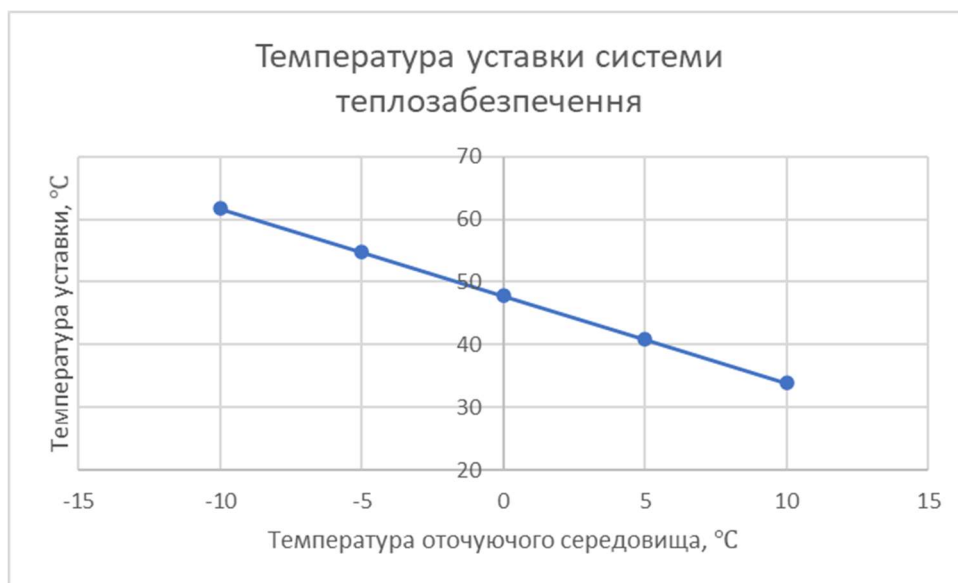


Рисунок 1.7. Графіка залежності температури прямої води від зовнішньої температури

Моделювання ТНУ повинно враховувати динамічні режими її роботи, зокрема зміни температури зовнішнього повітря та періоди пікових навантажень. Для цього система розглядається у вигляді послідовності теплових режимів.

Алгоритм моделювання динамічних режимів можна описати наступними етапами:

- Розрахунок теплових потреб будівлі в кожний часовий момент.
- Визначення робочих параметрів ТНУ.
- Оцінка ефективності роботи системи за заданий період.

Кожен із розглянутих підходів має свої переваги та обмеження. Аналітичний підхід забезпечує високу точність для простих систем, тоді як чисельні методи дозволяють моделювати складні багатофакторні процеси. Нейромережеві моделі ефективні для задач прогнозування та оптимізації, особливо в умовах змінних режимів роботи системи.

Методи моделювання є невід'ємною частиною процесу розробки та аналізу систем теплозабезпечення з ТНУ. Використання MATLAB Simulink, з урахуванням зовнішніх впливів та динамічних режимів роботи,

дозволяє створювати гнучкі та ефективні моделі, які відповідають сучасним вимогам енергоефективності. Завдяки поєднанню різних підходів можна досягти високої точності моделювання та оптимізації роботи ТНУ.

1.4. Підходи до керування ТНУ

Ефективне управління ТНУ є важливим завданням для забезпечення оптимальної роботи системи теплозабезпечення. Головна мета управління полягає у досягненні необхідного рівня температурного комфорту з мінімальними витратами енергії. Це досягається шляхом регулювання режимів ТНУ залежно від змін зовнішніх та внутрішніх умов.

Ключові аспекти управління ТНУ включають:

- Оптимізацію температурного режиму на виході системи;
- Регулювання потужності компресора залежно від теплового навантаження;
- Зниження енергоспоживання в періоди зниженого теплового навантаження (нічний час або відсутність людей);

На сьогодні існує кілька підходів управління ТНУ, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Основні підходи можна класифікувати наступним чином:

- Пропорційно-інтегрально-диференціальне регулювання

ПІД-регулятори є традиційним підходом до управління тепловими системами. Вони забезпечують точне підтримання заданої температури шляхом поточного відхилення (Р), інтеграції попередніх помилок (І) та прогнозування зміни (D)[41]. Алгоритм роботи регулятора можна описати рівнянням (1.6):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1.6)$$

де:

- $u(t)$ - управляючий сигнал;
- $e(t)$ - помилка (різниця між заданою та поточною температурою);
- K_p, K_i, K_D - коефіцієнти пропорційної, інтегральної, диференціальної складових.

Недоліки ПІД-регуляторів включають:

- Нелінійність об'єкта керування - ТНУ та система теплозабезпечення часто мають суттєву нелінійну динаміку, зокрема через зміну фізичних властивостей робочого тіла, умов зовнішнього середовища, тощо, що призводить до погіршення ефективності ПІД регулювання, налаштованого за лінеаризованою моделлю;
- Відсутність механізму врахування теплової інерції будівлі та різних факторів середовища - Задля ефективної роботи в режимі зниженої уставки на ніч та програмованого розігріву на ранок необхідно оцінювати теплоємність будівлі, швидкість втрат тепла та прогноз погоди. ПІД-регулятори не враховують цих параметрів та не можуть "передбачити" вплив запізнення накопичення тепла в конструкціях будівлі, що призводить до систематичного недогріву або перегріву приміщення.
- Зростання енерговитрат у разі неправильного налаштування - При відсутності коректної методики ідентифікації параметрів ПІД-регулятора або при ігноруванні специфіки нічного режиму можуть виникати часті увімкнення/вимкнення компресора чи інші нестабільні режими роботи. Це знижує загальну ефективність системи, підвищує швидкість

зношування обладнання та призводить до зростання експлуатаційних витрат.

- Модельно-прогнозуюче управління (Model Predictive Control, MPC)

Модельно-прогнозуюче керування (Model Predictive Control, MPC) є сучасним підходом до управління ТНУ, який базується на використанні математичної моделі системи для прогнозування її поведінки в майбутньому. Основна мета MPC — забезпечити оптимальну роботу системи в умовах змінних зовнішніх і внутрішніх факторів, таких як температура навколишнього середовища, динаміка теплового навантаження та обмеження потужності[42], [43].

Основні особливості MPC:

- Прогнозування майбутніх станів системи: На основі математичної моделі та поточних даних система прогнозує майбутні значення параметрів (наприклад, температури теплоносія).
- Оптимізація керуючого впливу: Використовується цільова функція для визначення оптимальних значень керуючих сигналів на певному горизонті часу.
- Реалізація принципу зворотного зв'язку: На кожному кроці розраховується оптимальний керуючий вплив, але реалізується лише перший елемент оптимальної траєкторії, після чого алгоритм повторюється.

Модель ТНУ відображає основні фізичні процеси, що відбуваються в системі: теплообмін, енергоспоживання компресора, залежність коефіцієнта трансформації (COP) від зовнішньої температури. У загальному вигляді динамічна модель системи описується рівняннями (1.7, 1.8):

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k), \quad (1.7)$$

$$y_k = g(x_k, u_k) \quad (1.8)$$

де:

- x_k — стан системи;
- u_k — керуючі дії;
- y_k — вихідні параметри системи;
- f, g - нелінійні функції, що описують динаміку системи;

На основі поточного стану x_k та прогнозів змін зовнішніх умов (температури зовнішнього повітря, теплового навантаження) обчислюються можливі майбутні стани системи $x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_{k+N}$, де N — горизонт прогнозування.

Для визначення оптимального керуючого впливу використовується цільова функція, яка мінімізує енергоспоживання та відхилення температури від заданого значення (1.9):

$$J = \sum_{k=1}^N (\alpha(T_{\text{зад}}(k) - T_{\text{факт}}(k))^2 + \beta P_{\text{ТНУ}}(k)^2), \quad (1.9)$$

$T_{\text{зад}}(k)$ - задана температура;

$T_{\text{факт}}(k)$ - фактична температура;

$P_{\text{ТНУ}}(k)$ - потужність компресора;

α, β - вагові коефіцієнти, що визначають пріоритети між тепловим комфортом і енергоефективністю.

З отриманої траєкторії керуючих дій $u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N}$ виконується лише перший крок u_k , після чого процес повторюється.

На основі цього можна сформулювати наступний список ключових переваг МПК у система теплозабезпечення на базі ТНУ:

- Урахування динамічних змін та прогнозів. МРС-регулятори будують прогнози майбутніх змін температури, навантаження та зовнішніх факторів, що дає змогу заздалегідь реагувати на майбутні коливання.

- Оптимізація з урахуванням обмежень. За допомогою MPC можна враховувати конкретні технічні ліміти (максимальна потужність компресора ТНУ, швидкість зміни температури тощо) та забезпечувати оптимальний компроміс між швидкістю розігріву, комфортом і витратами енергії.
- Зменшення перепадів і пікових навантажень. Завдяки глибшому аналізу і передбаченню майбутніх станів система плавно переходить від нічного режиму до ранкового розігріву, мінімізуючи різкі коливання в роботі обладнання.

Сформований список недоліків та потенційних подальшій покращень:

- Високі вимоги до обчислювальних ресурсів. Використання MPC-регуляторів вимагає періодичного розв'язання задач оптимізації в реальному часі, що потребує потужного програмно-апаратного забезпечення.
- Необхідність точної математичної моделі. Для ефективної роботи MPC потрібна адекватна модель системи (динаміка ТНУ, теплові втрати будівлі), а її побудова та актуалізація вимагають суттєвих затрат часу та ресурсів.
- Складність розгортання та налаштування. Впровадження системи на базі MPC-регуляторів ускладнюється через потребу у спеціалізованому програмному забезпеченні і кваліфікованих фахівцях із теорії керування та моделювання теплових процесів.

Модельно-прогнозуюче керування є перспективним підходом до управління ТНУ, яке дозволяє забезпечити високий рівень теплового комфорту при мінімальних витратах енергії. Завдяки прогнозуванню майбутніх станів системи та оптимізації керуючих дій MPC забезпечує адаптацію до змінних умов, що є критично важливим для ефективної роботи сучасних систем тепlopостачання.

- Логічне та релейне керування

Ці методи реалізуються через автоматичне вмикання або вимикання компонентів ТНУ при досягненні порогових значень температур, тиску чи вологості[44]:

- Дворівневе релейне керування: компресор працює на повну потужність до досягнення заданих умов і повністю виключається при їх перевищенні.
- Релейне керування на декілька рівнів: застосовується у великих системах із кількома компресорами або з підтримкою декількох рівнів потужності.

Попри простоту, релейне керування може призводити до частих увімкнень/вимкнень, що знижує ресурс обладнання та економічну ефективність.

Таким чином, незважаючи на те, що класичні ПД-регулятори й надалі є основою систем керування ТНУ завдяки простоті та надійності, вони часто демонструють обмежену гнучкість у разі суттєвих змін зовнішніх і внутрішніх умов. Інтелектуальні підходи — нечітка логіка, нейронні мережі та екстремальне керування — дають змогу підвищувати точність регулювання й енергоефективність, ефективно реагуючи на змінні режими навантаження. Найбільш перспективним напрямом розвитку вважається комплексне поєднання класичних і “розумних” методів, що дозволить створити адаптивні системи керування ТНУ, оптимізовані одночасно за критеріями надійності, енергоспоживання та комфорту.

1.5 Перспективи впровадження переривчастого обігріву

Застосування переривчастого обігріву в системах керування ТНУ спрямоване на підвищення енергоефективності у будівлях, де тепловий режим протягом доби зазнає суттєвих змін. Суть такого підходу полягає у формуванні зниженої температурної уставки на нічний період, коли у приміщенні немає людей, та в завчасному переході до режиму розігріву напередодні ранкового виходу обладнання на номінальне навантаження. При цьому з 8-ї години ранку до завершення робочого дня ТНУ працює в режимі забезпечення комфортної температури. Нижче розглянуто перспективи впровадження інтервального контролю, наведено схему його реалізації та обґрунтовано доцільність алгоритму формування уставки для PID-регулятора[45].

Зазвичай у будівлях адміністративного чи виробничого призначення протягом нічних годин (наприклад, з 20:00 до 8:00) не вимагається підтримувати номінальний рівень температурного комфорту. Це дає змогу зменшити споживання енергії, знижуючи уставку на декілька градусів, або навіть вимикати частину обладнання ТНУ, якщо це дозволяє технологічний регламент. Однак повне відключення ТНУ може призвести до надмірного охолодження приміщення та тривалої фази прогріву вранці, що, своєю чергою, спричиняє пікові навантаження на систему[45].

Натомість інтервальний контроль покликаний збалансувати ці процеси (рис. 1.8):

- Нічний режим (знижена уставка): У нічний час температура подачі теплоносія знижується до оптимального значення, що дозволяє мінімізувати витрати енергії.
- Режим ранкового розігріву: За певний час до початку робочого дня ТНУ переходить у режим підвищеної потужності для досягнення комфортної температури до 8:00.

- Денний режим (номінальний рівень комфорту): Система керування утримує цільову температуру на рівні, комфортному для перебування людей упродовж робочого дня (з 8:00 до 20:00 або іншого періоду активного використання будівлі) .

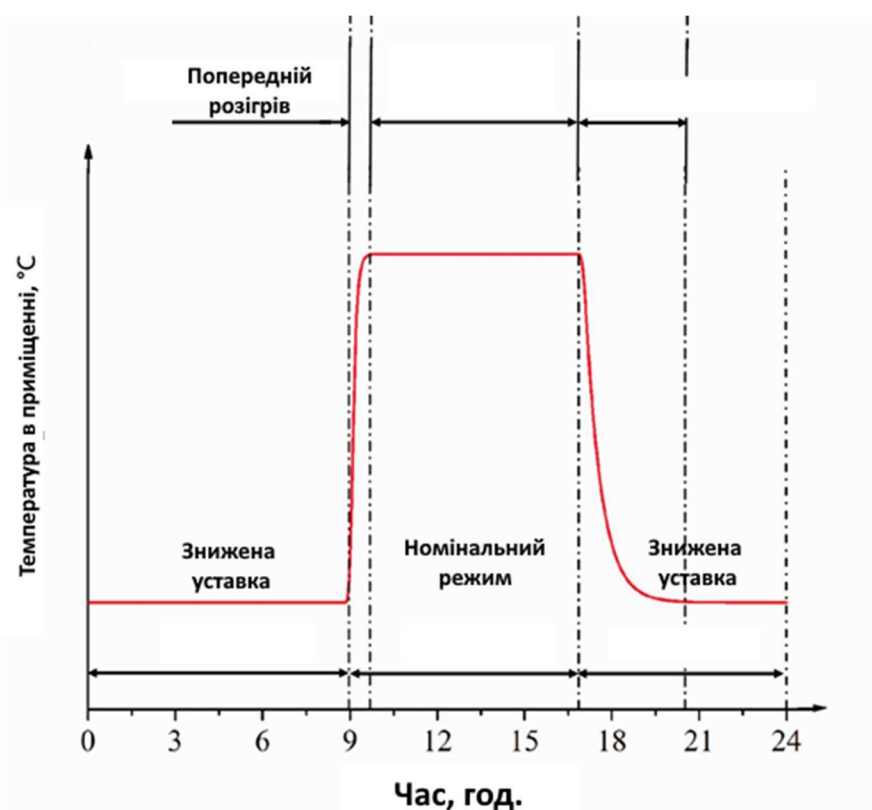


Рисунок 1.8. Графік добового температурного графіка роботи системи з позначенням нічного режиму, розігріву та денного режиму

Класичний PID-регулятор підтримує параметр (температуру) на основі фіксованого значення уставки, реагуючи на відхилення фактичної температури від заданої. У разі інтервального контролю пропонується динамічна зміна цього цільового значення згідно з графіком добового циклу. Типова залежність уставки від часу доби може описуватися функцією (1.10):

$$T_{set}(t) = \begin{cases} T_{night}, & t \in [t_{night_start}, t_{preheat_start}] \\ f_{ramp}(t), & t \in [t_{preheat_start}, t_{day_start}] \\ T_{day}, & t \in [t_{day_start}, t_{night_start}] \end{cases} \quad (1.10)$$

де:

T_{night} – знижена температура уставки для нічного періоду;

T_{day} – денний (номінальний) тепловий режим;

$t_{night-start}$ – час початку нічного режиму;

$t_{preheat-start}$ – час початку (випередження) розігріву;

$t_{day-start}$ – час переходу до денного режиму;

$T_{preheat}$ – температура уставки в режимі розігріву;

До переваг переривчастого обігріву можна віднести наступне:

- Підвищення енергоефективності - зниження температури вночі зменшує витрати електроенергії, тоді як своєчасний нагрів дає змогу не перевантажувати ТНУ в пікові моменти.
- Гнучкість налаштування - переривчастий обігрів можна узгодити із змінним розкладом використання будівлі (вихідні дні, свята).
- Збереження комфортних умов - правильно обчислений час початку розігріву дає змогу досягти заданої температури саме до початку перебування людей у будівлі.

Суттєвим обмеженням, яке необхідно врахувати для забезпечення температурного комфорту це інерційній системи опалення та будинку. За великої теплової інерції будівлі може траплятись недогрів або перегрів, якщо це не враховано алгоритмом керування.

Інтервальний контроль є ефективним підходом підвищення адаптивності класичних систем керування теплозабезпеченням на базі ТНУ

та зменшення витрат електроенергії, особливо в комерційних чи адміністративних будівлях з чітко визначеним розкладом користування. Поєднання інтервального підходу із сучасними алгоритмами може вдосконалити та поліпшити ефективність роботи систем теплозабезпечення, беручи до уваги зовнішні та внутрішні чинники.

Отже, переривчастий контроль здатен не лише знизити витрати електроенергії за рахунок керованого зниження уставки впродовж нічного періоду, а й забезпечити комфортний рівень температурного режиму будівлі завдяки вчасному розігріву. Завдяки розробці алгоритмів формування температурної уставки для ПІД-регулятора цей метод дозволяє адаптувати систему до змінних умов експлуатації, що робить його перспективним напрямом розвитку сучасних систем тепlopостачання. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів розрахунку уставок і інтеграцію інтервального контролю з інтелектуальними системами управління будівлями.

1.6 Висновки до розділу

У першому розділі виконано аналітичний огляд сучасних тенденцій, методів моделювання та управління ТНУ у системах теплозабезпечення. На основі аналізу літературних джерел і результатів попередніх досліджень сформульовано наступні висновки:

1.6.1. Сучасний стан і перспективи розвитку ТНУ

1. Значення ТНУ - ТНУ є ключовим елементом сучасних систем тепlopостачання завдяки високій енергоефективності, екологічності та можливості використання відновлюваних джерел енергії. Зростаючі вимоги до зменшення викидів CO₂ та економії енергоресурсів підвищують актуальність впровадження ТНУ в житлових, комерційних і промислових об'єктах.

2. Інтеграція ТНУ у розумні системи керування будинком - сучасні тенденції розвитку систем теплопостачання спрямовані на інтеграцію ТНУ в автоматизовані та "розумні" системи управління, що дозволяє підвищити енергоефективність і комфортність експлуатації.

1.6.2. Методи моделювання та управління ТНУ

3. Моделювання теплових процесів - методи моделювання, зокрема використання MATLAB Simulink, дозволяють ефективно аналізувати теплові процеси в ТНУ та системах теплозабезпечення з урахуванням динамічних змін зовнішніх факторів. Інтеграція фізичних моделей і алгоритмів управління сприяє оптимізації роботи системи.

4. Методи управління - основні підходи до управління ТНУ включають класичні методи (PID-регулятори), переривчасті та інтелектуальні методи. Кожен з методів має свої переваги та недоліки, що визначаються специфікою умов експлуатації та завдань системи.

1.6.3 Переривчасте керування як перспективний підхід

5. Особливості переривчастого контролю - переривчасте керування передбачає адаптацію роботи ТНУ залежно від часу доби. У нічний період реалізується знижена температура подачі теплоносія для економії енергії, а завчасний перехід до режиму розігріву забезпечує комфортний тепловий режим до початку робочого дня.

6. Переваги переривчастого керування - цей підхід дозволяє знижувати енергоспоживання та забезпечувати температурний комфорт, оптимізуючи експлуатаційні витрати. Розробка алгоритму формування уставок для ПІД-регулятора є ключовим завданням для впровадження інтервального контролю.

1.6.4. Подальші напрями досліджень

7. Розробка адаптивного переривчастого контролю для ТНУ - необхідність створення алгоритмів, які враховують динамічні зміни теплового навантаження протягом добового циклу. Основна увага буде приділена формуванню оптимальних уставок для нічного режиму, перехідного розігріву та денного періоду з використанням даних про теплові процеси в будівлі.

8. Інтеграція алгоритму врахування зовнішніх умов у систему контролю - врахування температури зовнішнього середовища для завчасного переходу ТНУ в режим розігріву. Це дозволить оптимізувати роботу системи та знизити пікові навантаження на компресор.

9. Оцінка енергетичної та економічної ефективності переривчастого керування - виконання детального аналізу впливу інтервального управління на енергоспоживання та експлуатаційні витрати ТНУ. Це дозволить обґрунтувати впровадження розроблених підходів у реальних умовах.

Загалом, аналіз наукових публікацій і практичного досвіду експлуатації ТНУ свідчить, що оптимальні результати дає поєднання класичних методів регулювання з елементами інтелектуальних алгоритмів. Такий гібридний підхід дає змогу підвищити стійкість і швидкість реакції системи на динамічні зміни навантаження, зберігаючи при цьому універсальність і зрозумілість реалізації. У рамках цього дослідження особливу увагу буде приділено розробленню алгоритму адаптивного формування уставок для режиму нічного зниження й ранкового розігріву, а також порівнянню результатів для різних конфігурацій.

Отже, результати, отримані у цьому розділі, закладають теоретичне підґрунтя для розробки та впровадження практично орієнтованих

алгоритмів керування ТНУ для підвищення енергоефективності та рівня автоматизації систем теплопостачання.

На основі отриманих висновків було сформульовано мету дисертаційного дослідження, а саме: підвищення енергетичної ефективності теплозабезпечення будинку шляхом розробки системи керування переривчастим обігрівом на базі ТНУ.

Для виконання поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання дослідження:

1. Розроблення та реалізація аналітичної моделі для дослідження динамічних режимів роботи ТНУ;
2. Створення та реалізація на базі розробленої аналітичної моделі нейронної моделі з метою зменшення машинного часу розрахунку;
3. Інтеграція нейронної моделі ТНУ в загальну модель системи теплозабезпечення будинку;
4. Визначення та дослідження впливу параметрів переривчастого обігріву на енергетичну ефективність ТНУ;
5. Інтеграція отриманих моделей та розроблення системи керування переривчастим обігрівом з метою підвищення енергетичної ефективності ТНУ

Розділ 2. Розробка аналітичної моделі ТНУ

2.1. Аналіз сучасних методів моделювання ТНУ

Моделювання ТНУ відіграє ключову роль у процесі їх проектування, оптимізації та впровадження. Ефективні математичні моделі дозволяють оцінити продуктивність, енергетичну ефективність та адаптивність системи до змінних умов експлуатації. В умовах зростаючих вимог до енергозбереження та зниження вуглецевих викидів створення точних моделей ТНУ стає невід'ємною складовою сталого розвитку енергетичних систем. У цьому розділі розглядаються сучасні методи моделювання ТНУ, включаючи аналітичні, емпіричні та гібридні підходи, їх особливості, переваги й обмеження.

Методи моделювання ТНУ можна умовно поділити на три основні групи, кожна з яких має специфічні особливості й застосування:

1. **Аналітичні моделі** Аналітичний підхід базується на використанні фундаментальних законів термодинаміки, теплопередачі та гідродинаміки. Основні елементи таких моделей включають:
 - Рівняння енергетичного балансу, що описує перерозподіл теплової енергії між компонентами;
 - Рівняння теплопередачі, які враховують фізичні властивості робочого тіла;
 - Рівняння стану, що описують теплофізичні властивості робочих тіл.

Аналітичні моделі забезпечують високий рівень точності й деталізації, дозволяючи імітувати широкий спектр режимів роботи ТНУ.

Основний недолік цього підходу полягає у складності його реалізації. Реалізація аналітичних моделей для багатокomпонентних систем вимагає

значних обчислювальних ресурсів і глибоких знань фізичних процесів, що може ускладнювати їх застосування в реальних умовах.

2. Емпіричні моделі Емпіричні моделі базуються на аналізі експериментальних даних і апроксимації залежностей між ключовими параметрами системи. До таких моделей належать:

- Регресійні моделі, які використовуються для опису залежностей між вхідними та вихідними параметрами системи;
- Нейронні мережі, здатні навчатися на великих обсягах даних для прогнозування продуктивності ТНУ;
- Алгоритми машинного навчання, що знаходять застосування для аналізу великих даних і адаптації моделей до нових умов експлуатації.

Емпіричні моделі є простішими у реалізації, забезпечуючи швидкі обчислення. Проте їх точність значною мірою залежить від якості й обсягу вихідних даних. У разі недостатньої репрезентативності навчальних даних моделі можуть демонструвати низьку точність у непередбачуваних умовах. Крім того, емпіричні моделі часто не враховують фундаментальних фізичних закономірностей процесів, що обмежує їх застосування для моделювання складних сценаріїв.

3. Гібридні моделі Гібридні моделі поєднують у собі переваги аналітичного та емпіричного підходів. Наприклад, фундаментальні рівняння можуть бути доповнені емпіричними кореляціями для врахування нелінійних чи складних процесів. Гібридні моделі забезпечують компроміс між точністю й складністю, дозволяючи адаптуватися до змінних умов експлуатації. Вони також дозволяють

враховувати взаємодію між компонентами ТНУ, що має критичне значення для комплексного аналізу систем.

Аналітичні моделі забезпечують високу точність і детальність моделювання, що робить їх корисними для фундаментальних досліджень і проектування нових систем. Проте їх складність і значні обчислювальні витрати можуть стати перешкодою для використання у великих системах реального часу.

Емпіричні моделі є ефективними для швидкого аналізу й прогнозування. Їх простота й адаптивність дозволяють швидко реагувати на зміну умов експлуатації, проте вони мають обмежену універсальність і залежність від навчальних даних.

Гібридні моделі пропонують оптимальний баланс між точністю й складністю. Вони особливо перспективні для моделювання складних систем, таких як ТНУ, де необхідно враховувати взаємодію компонентів і змінність зовнішніх умов.

Для створення й реалізації моделей ТНУ широко застосовуються спеціалізовані програмні пакети:

- **MATLAB/Simulink**: забезпечує універсальні інструменти для побудови математичних моделей, інтеграції з бібліотеками, такими як CoolProp, та проведення динамічних симуляцій[46];
- **TRNSYS**: потужний інструмент для довготривалих симуляцій, зокрема моделювання сезонних режимів роботи системи[47];
- **EES (Engineering Equation Solver)**: використовується для швидкого розв'язання термодинамічних рівнянь та оцінки ефективності систем[48];

- **EnergyPlus**: спеціалізується на моделюванні систем HVAC, включаючи ТНУ, з можливістю інтеграції в складні енергетичні моделі будівель[49].

Кожен із цих інструментів має свої переваги та недоліки залежно від цілей і складності задачі моделювання (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Порівняння різних програмних пакетів

Програмний пакет	Основна функціональність	Переваги	Недоліки
MATLAB/Simulink	Моделювання динамічних систем, інтеграція бібліотек, таких як CoolProp	Універсальність, гнучкість, підтримка різних інструментів	Висока вартість ліцензії
TRNSYS	Довготривалі симуляції, моделювання сезонних режимів	Потужний для аналізу енергетичних систем	Висока складність для початкового освоєння
EES	Розв'язання термодинамічних рівнянь	Простота використання, швидкість обчислень	Обмежені можливості для комплексного моделювання
EnergyPlus	Моделювання систем HVAC та будівельних енергетичних систем	Висока деталізація, можливість інтеграції з іншими інструментами	Складність налаштування для початківців

Методи моделювання ТНУ охоплюють широкий спектр підходів, що дозволяють ефективно вирішувати задачі оптимізації, проектування й управління. Аналітичні моделі забезпечують глибоке розуміння фізичних процесів, тоді як емпіричні моделі пропонують швидкість і простоту реалізації. Гібридний підхід є найбільш перспективним для задач, що вимагають одночасно високої точності та адаптивності. У рамках цієї роботи доцільним є використання аналітичного підходу з інтеграцією програмного пакету CoolProp, що забезпечує точність розрахунків теплофізичних властивостей. Майбутній розвиток гібридних моделей дозволить підвищити ефективність ТНУ, враховуючи змінні умови експлуатації та складні взаємодії між компонентами.

2.2. Основні етапи створення аналітичної моделі ТНУ

Аналітичне моделювання ТНУ є основою для дослідження їх енергетичної ефективності, оцінки впливу зовнішніх умов та оптимізації теплотехнічних процесів. Глибока математична модель дозволяє не лише прогнозувати поведінку системи, а й виявляти ключові закономірності, що сприяють вдосконаленню конструкції та режимів роботи. В умовах постійного зростання вимог до енергоефективності та сталого розвитку, створення аналітичних моделей ТНУ є важливим завданням як для наукових досліджень, так і для практичного застосування в енергетиці. У цьому розділі розглядаються основні етапи створення моделі ТНУ типу "повітря-вода" з акцентом на фізичні принципи, математичні методи та сучасне програмне забезпечення.

Розробка аналітичної моделі починається з визначення чітких цілей, які включають:

- **Дослідження теплових процесів:** вивчення теплопередачі та енергетичних перетворень у ключових компонентах системи.

- **Моделювання впливу зовнішніх умов:** оцінка впливу змін температури повітря, вологості, швидкості вітру на роботу системи.
- **Розрахунок показників ефективності:** визначення коефіцієнта перетворення енергії (COP), споживання електроенергії, теплової потужності та інших ключових параметрів.
- **Забезпечення інтеграції з системами автоматизації:** створення моделі, здатної адаптуватись до зовнішніх змін і забезпечувати оптимальне управління роботою ТНУ.

Основою для побудови моделі є фундаментальні фізичні закони, що описують функціонування ТНУ. Серед основних фізичних принципів:

1. **Закон збереження енергії:** Цей закон є основою для теплового балансу між компонентами системи. Він дозволяє моделювати перерозподіл енергії між випарником, компресором, конденсатором і дросельним вентилем.
2. **Закони теплопередачі:** Передача тепла між робочим середовищем і повітрям у випарнику та між холодоагентом і теплоносієм у конденсаторі описується через диференціальні рівняння теплопровідності.
3. **Математичні моделі для визначення теплофізичних властивостей:** Визначають параметри стану робочих речовин за вихідними умовами через рівняння взаємозв'язку характеристик.
4. **Рівняння гідродинаміки:** Визначають швидкість, тиск і об'єми потоків у теплообмінниках, що впливають на теплові втрати й ефективність системи.

Створення математичної моделі включає формулювання рівнянь для кожного з компонентів системи.

1. Модель випарника:

- Рівняння енергетичного балансу та рівняння теплопередачі.

2. Модель компресора:

- Акумуляційні властивості не враховуються, моделювання реалізовано на основі енергетичного балансу з урахуванням ізоентропійного коефіцієнта корисної дії.

3. Модель конденсатора:

- Рівняння енергетичного балансу та рівняння теплопередачі.

4. Дросельний вентиль:

- Дросельний вентиль моделюється в умовах ізоентропійного розширення.

Наступним етапом є опис та інтеграція компонентів в загальну модель із врахуванням:

- Узгодження вихідних і вхідних параметрів для забезпечення послідовності роботи системи.
- Дотримання енергетичного балансу між усіма компонентами.
- Моделювання динамічної взаємодії між компонентами в умовах змінних зовнішніх факторів.

Вхідними параметрами для розрахунку є:

- температура та тиск теплоносія низькотемпературного джерела на вході у випарник;
- площа теплопередачі випарника та конденсатора;
- теплова потужність конденсатора;
- об'єм робочих тіл в випарнику та конденсаторі;
- коефіцієнти теплопередачі в області випарника та конденсатора.

Реалізація аналітичної моделі здійснюється за допомогою MATLAB/Simulink, який надає можливості для:

- Побудови моделей компонентів із застосуванням диференціальних рівнянь.
- Інтеграції бібліотек, таких як CoolProp, для точного розрахунку теплофізичних властивостей робочих середовищ.
- Симуляції динамічних режимів роботи системи та аналізу ефективності роботи за змінних умов.

Крім того, MATLAB дозволяє проводити оптимізацію параметрів роботи ТНУ для забезпечення максимального COP у заданих умовах експлуатації.

Валідація моделі є ключовим етапом, що включає:

- Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними для оцінки точності розрахунків.
- Аналіз похибок моделі в різних режимах роботи.
- Апробацію моделі на основі сценаріїв реальних умов експлуатації для визначення її універсальності.

Процес створення аналітичної моделі ТНУ включає кілька послідовних етапів, кожен із яких спрямований на підвищення точності й гнучкості моделі. Використання MATLAB/Simulink у поєднанні з сучасними бібліотеками для розрахунку теплофізичних властивостей забезпечує можливість моделювання складних теплотехнічних процесів у реальних умовах експлуатації. Розроблена модель є основою для подальшого вдосконалення ТНУ і оптимізації їх роботи.

2.3. Використання програмного пакету CoolProp

CoolProp є сучасним інструментом для розрахунків теплофізичних властивостей робочих середовищ, який активно використовується в енергетиці, холодильних системах і системах кондиціонування повітря. Цей програмний пакет надає точні дані для широкого спектра речовин, включаючи холодоагенти, воду, повітря та інші робочі тіла, що робить його незамінним у процесі моделювання ТНУ. У цьому розділі розглянуто ключові можливості CoolProp, його інтеграцію із середовищем MATLAB/Simulink, а також використання цього пакету для розрахунків у межах створення аналітичної моделі ТНУ[50].

CoolProp підтримує широкий спектр функцій для визначення термодинамічних і теплофізичних властивостей робочих середовищ. До його основних можливостей належать[50]:

- **Розрахунок термодинамічних параметрів:** тиску, температури, ентальпії, ентропії, щільності, теплоємності тощо.
- **Моделювання фазових переходів:** визначення точок насичення, фазових рівноваг і критичних параметрів.
- **Велика база даних по робочим тілам:** бібліотека містить дані для понад 100 робочих тіл, включаючи як стандартні робочі тіла (R-134a, R-410A), так і нові екологічно безпечні суміші.
- **Висока точність:** використання експериментальних даних і складних моделей для обчислень теплофізичних властивостей.

CoolProp легко інтегрується із MATLAB/Simulink, що дозволяє використовувати його можливості безпосередньо в процесі моделювання (рис. 2.1). Основні етапи інтеграції включають:

1. **Інсталяція пакету:** CoolProp доступний як бібліотека та має інтерфейси для MATLAB через функції зовнішніх викликів.

Завантаження й налаштування пакета здійснюється за допомогою офіційної документації.

2. **Використання функцій:** MATLAB дозволяє викликати функції CoolProp для отримання властивостей робочих середовищ.

Наприклад:

```
h = CoolProp.PropsSI('H', 'T', 300, 'P', 101325, 'R134a');
```

Цей код розраховує ентальпію холодоагенту R-134a при температурі 300 К і тиску 101325 Па.

3. **Інтеграція з Simulink:** Для використання в Simulink, функції CoolProp можна обгорнути в MATLAB Function Blocks. Це забезпечує розрахунок теплофізичних властивостей під час симуляції системи.

```
ro_EV_h_evap_Des = py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('D','T',0.5 * ...
    (T_EV_h_in_Des + T_EV_h_out_Des), 'P',p_EV_in_Des,wf_EV_h);

c_p_EV_h_evap_Des = py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C','T',0.5 * ...
    (T_EV_h_in_Des + T_EV_h_out_Des), 'P',p_EV_in_Des,wf_EV_h);

ro_CD_c_cond_Des = py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('D','T',0.5 * ...
    (T_CD_c_in_Des + T_CD_c_out_Des), 'P',p_CD_in_Des,wf_EV_h);

c_p_CD_c_cond_Des = py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C','T',0.5 * ...
    (T_CD_c_in_Des + T_CD_c_out_Des), 'P',p_CD_in_Des,wf_EV_h);
```

Рисунок 2.1. Приклад інтеграції та використання CoolProp у MATLAB/Simulink.

CoolProp відіграє ключову роль у забезпеченні точності моделі ТНУ завдяки обчисленню параметрів, які змінюються залежно від умов роботи. Основні етапи використання CoolProp у моделі ТНУ включають:

1. **Розрахунок параметрів робочого тіла:**

- Температура та тиск у випарнику й конденсаторі.

- Ентальпія та ентропія на вході і виході компресора.

2. Визначення властивостей теплоносія:

- Щільність, теплоємність і теплопровідність води, що циркулює в системі опалення.

3. Моделювання фазових переходів:

- Аналіз процесів випаровування та конденсації холодоагенту.

4. Динамічні розрахунки: CoolProp дозволяє виконувати динамічні обчислення в залежності від зміни температури, тиску та інших параметрів у реальному часі під час симуляції системи.

CoolProp є потужним інструментом для розрахунків теплофізичних властивостей, що значно підвищує точність моделювання ТНУ. Інтеграція цього пакета з MATLAB/Simulink забезпечує зручність і ефективність у процесі розробки аналітичних моделей, дозволяючи досліджувати поведінку системи в реальних умовах експлуатації. Завдяки гнучкості й точності CoolProp, його використання сприяє створенню надійних і ефективних ТНУ.

2.4. Математична модель основних компонентів ТНУ

Розробка математичної моделі основних компонентів ТНУ є важливим кроком для забезпечення її ефективної роботи, оптимізації енергоспоживання та адаптації до змінних умов експлуатації. Така модель не лише дозволяє детально аналізувати фізичні процеси в системі, але й забезпечує основу для впровадження інтелектуальних алгоритмів керування. У цьому розділі представлено детальне математичне моделювання ключових компонентів ТНУ: випарника, компресора, конденсатора та дросельного вентиля, із врахуванням сучасних підходів до енергетичного аналізу[22], [23].

2.4.1. Модель випарника

Випарник є одним із ключових компонентів ТНУ, відповідальним за абсорбцію тепла з навколишнього середовища та його передачу до холодоагенту. Енергетичний баланс робочого тіла у випарнику описується наступним рівнянням (2.1)[22], [23]:

$$c_{wf,EV} M_{wf,EV} \frac{dT_{wf,EV}}{d\tau} = G_{wf} (h_{EV,in} - h_{EV,out}) + k_{EV} A_{EV} \left(\frac{T_{air,in} + T_{aur,out}}{2} - T_{wf,EV} \right), \quad (2.1)$$

де:

$c_{wf,EV}$ - теплоємність робочого тіла в області випарника, Дж/(кг·К);

$M_{wf,EV}$ — маса робочого тіла в області випарника, кг;

$T_{wf,EV}$ — температура робочого тіла в області випарника, К;

G_{wf} - витрата робочого тіла через випарник, кг/с;

$h_{EV,in}, h_{EV,out}$ — питома ентальпія робочого тіла на вході та виході з випарника, відповідно, Дж/кг;

k_{EV} - коефіцієнт теплопередачі в області випарника, Вт/(м²·К);

A_{EV} - площа теплопередачі, м²;

$T_{air,in}, T_{aur,out}$ - температури повітря на вході та виході з випарника, відповідно, К.

2.4.2. Модель компресора

Компресор забезпечує стиснення холодоагенту, що призводить до підвищення його тиску і температури, необхідних для роботи конденсатора. Приймається, що в компресорі перехідні процеси не відбуваються. У такому випадку енергетичний баланс цього елемента описується наступним рівнянням (2.2)[22], [23]:

$$W_{CM} = G_{wf} (h_{CM,out} - h_{CM,in}) \quad (2.2)$$

Де G_{wf} – витрата робочого тіла через компресор, кг/с;

$h_{CM,in}$ – питома ентальпія робочого тіла на вході у компресор, Дж/кг;

$h_{CM,out}$ – питома ентальпія робочого тіла на виході з компресора і визначалася за формулою:

$$h_{CM,out} = h_{CM,in} + \frac{h_{CM,out,is} - h_{CM,in}}{\mu_{is}},$$

$h_{CM,out,is}$ - питома ентальпія робочого тіла на виході з компресора після ізоентропійного стиснення, Дж/кг;

μ_{is} – ізоентропійний ККД компресора.

2.4.3. Модель конденсатора

Конденсатор виконує передачу тепла від холодоагенту до теплоносія. Це дозволяє завершити цикл теплопередачі в системі. Енергетичний баланс робочого тіла в конденсаторі виражається наступним рівнянням (2.3)[22], [23]:

$$C_{wf,CD} M_{wf,CD} \frac{dT_{wf,CD}}{d\tau} = G_{wf}(h_{CD,in} - h_{CD,out}) - k_{CD} A_{CD} \left(T_{wf,CD} - \frac{T_{water,in} + T_{water,out}}{2} \right), \quad (2.3)$$

, де $C_{wf,CD}$ – теплоємність робочого тіла в області конденсатора,

$M_{wf,CD}$ – маса робочого тіла в області конденсатора, кг;

$T_{wf,CD}$ – температура робочого тіла в області конденсатора, К;

G_{wf} – витрата робочого тіла через конденсатор, кг/с;

$h_{CD,in}, h_{CD,out}$ – питома ентальпія робочого тіла на вході та виході з конденсатора, відповідно, Дж/кг;

k_{CD} – коефіцієнт теплопередачі в області конденсатора, Вт/(м²×К);

A_{CD} – площа теплопередачі, м²;

$T_{water,in}, T_{water,out}$ – температури води на вході та виході з конденсатора відповідно, К;

2.4.4. Модель дросельного вентиля

Дросельний вентиль регулює тиск холодоагенту, створюючи умови для його випаровування у випарнику. Основні рівняння (2.4)[22], [23]:

$$h_{EXV,in} = h_{EXV,out}, \quad (2.4)$$

Де $h_{EXV,in}$ та $h_{EXV,out}$ – питома ентальпія робочого тіла на вході та виході з розширювального вентиля, відповідно кДж/кг;

2.4.5. Інтеграція компонентів у загальну модель

Інтеграція компонентів забезпечує системний підхід до моделювання ТНУ. Розроблена математична модель основних компонентів ТНУ забезпечує точний опис теплотехнічних і термодинамічних процесів, що

відбуваються в системі. Вона є основою для аналізу, оптимізації та впровадження сучасних систем автоматизованого керування. Завдяки адаптивності моделі до змінних умов експлуатації, вона дозволяє досягти підвищення енергоефективності, стабільності та довговічності ТНУ.

2.5. Реалізація моделі в середовищі MATLAB

Середовище MATLAB є ключовим інструментом для моделювання, аналізу та симуляції складних технічних систем, включаючи ТНУ. MATLAB забезпечує високий рівень гнучкості, інтеграції з додатковими бібліотеками (CoolProp) та можливість реалізації як статичних, так і динамічних моделей. У контексті попередньо розглянутої математичної моделі компонентів ТНУ, MATLAB надає необхідні інструменти для їх реалізації у вигляді функціональних модулів, які взаємодіють у загальній структурі системи. Реалізація моделі забезпечує точність розрахунків, візуалізацію процесів і оптимізацію параметрів роботи ТНУ для досягнення максимального коефіцієнта енергоефективності (COP)[22], [23].

2.5.1. Основні етапи реалізації моделі

Реалізація математичної моделі ТНУ у MATLAB включає такі ключові етапи:

- 1. Розробка модульної структури:** Модель поділяється на окремі компоненти: випарник, компресор, конденсатор і дросельний вентиль. Це дозволяє створити модулі з чітко визначеними вхідними та вихідними параметрами для кожного компонента. Такий підхід спрощує тестування та вдосконалення окремих частин системи.
- 2. Реалізація математичних рівнянь:** Для кожного компонента реалізуються математичні рівняння у вигляді функцій MATLAB.

Реалізовані функції використовуються як окремі блоки у загальній моделі.

3. **Інтеграція в Simulink:** Компоненти об'єднуються в середовищі Simulink. Для цього створюється блок-схема, де кожен модуль пов'язаний із сусідніми через відповідні сигнали, що забезпечує енергетичний і термодинамічний баланс у системі. Блоки Simulink дозволяють візуалізувати процеси та аналізувати їх взаємодію.
4. **Параметризація моделі:** Початкові значення параметрів, таких як площа теплообміну, коефіцієнти теплопередачі, витрата холодоагенту тощо, задаються через структури даних MATLAB. Це забезпечує гнучкість моделі та можливість швидкої адаптації до змін умов експлуатації.
5. **Тестування і валідація:** Модель перевіряється в різних режимах роботи для оцінки точності реалізації. Для валідації результатів використовуються експериментальні дані та порівняння з аналітичними розрахунками.

2.5.2. Реалізація моделі

Структурна схема динамічної моделі досліджуваної ТНУ, розробленої в середовищі Simulink, представлена на рис. 2.2. Цю модель можна розглядати як сукупність окремих блоків, кожен з яких відповідає за моделювання основних компонентів системи: компресора, конденсатора, розширювального вентиля та випарника. У процесі створення динамічних моделей цих компонентів використано рівняння та математичні залежності, наведені у попередньому розділі[22], [23].

Реалізація запропонованої моделі дозволяє отримати динаміку змін широкого спектру параметрів, таких як тиск, температура, витрати,

ентальпія та ентропія у ключових точках системи. Це, своєю чергою, забезпечує можливість виконання динамічного аналізу режимів роботи ТНУ[22], [23].

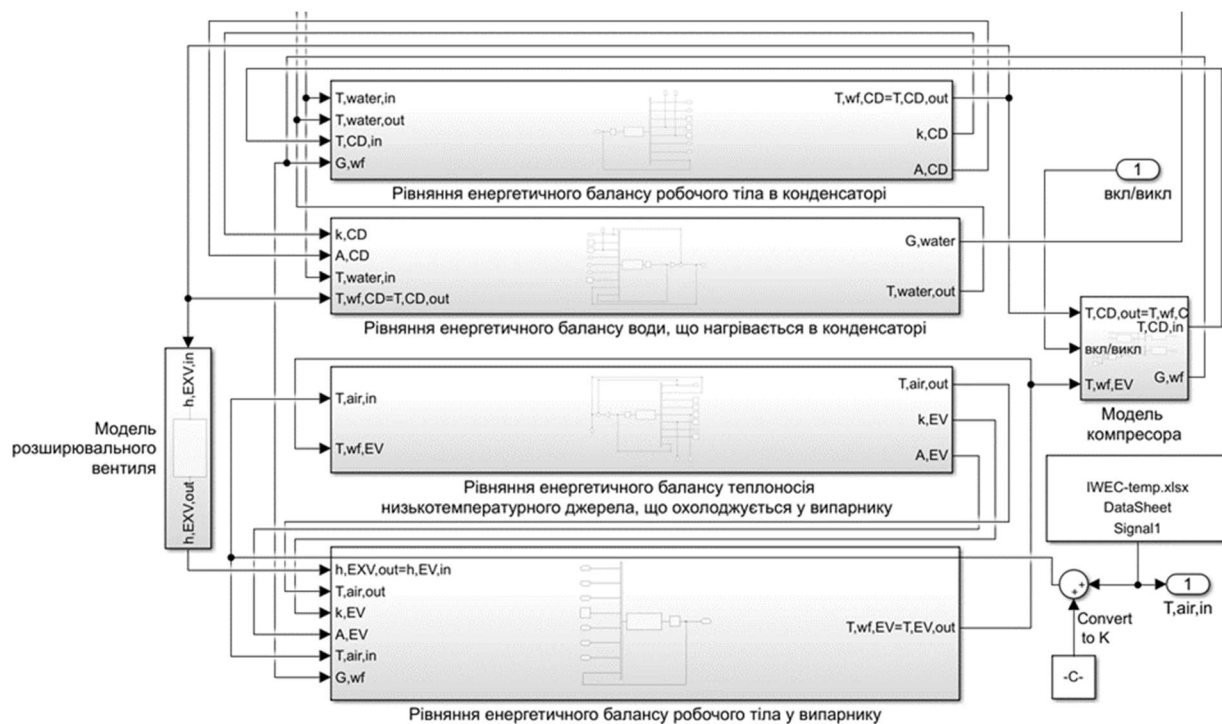


Рисунок 2.2. Структурна схема моделі ТНУ та взаємодія її компонентів в середовищі Simulink

Таким чином, розроблена модель забезпечує детальне дослідження теплових процесів у випарнику, дозволяючи аналізувати зміну параметрів у реальному часі та оцінювати ефективність роботи ТНУ.

2.5.3. Результати моделювання

Реалізована модель ТНУ у MATLAB дозволяє дослідити її роботу в різних умовах:

1. **Номінальний режим роботи:** Модель визначає COP, споживання електроенергії, теплові потужності випарника та конденсатора.
2. **Часткове навантаження:** Аналізується ефективність системи при зміні теплових навантажень, таких як зменшення витрати теплоносія.
3. **Динамічні умови:** Оцінюється реакція системи на зміни зовнішніх параметрів, таких як температура або тиск.

Реалізація моделі ТНУ у MATLAB створила ефективний інструмент для аналізу, оптимізації та дослідження роботи системи. Інтеграція CoolProp забезпечила точність у розрахунках термодинамічних властивостей, тоді як Simulink дозволила реалізувати комплексну блок-схему моделі з наочною візуалізацією. Модель відкриває перспективи для подальшої оптимізації ТНУ, зокрема впровадження передових алгоритмів автоматизованого керування та адаптації до змінних умов експлуатації.

2.6. Результати валідації аналітичної моделі

Валідація аналітичної моделі є критичним етапом дослідження, що дозволяє оцінити її здатність точно відображати реальні фізичні процеси, які відбуваються в ТНУ. Ефективність моделі визначається її відповідністю експериментальним даним і теоретичним розрахункам, а також здатністю коректно відтворювати статичні й динамічні режими роботи системи. У цьому розділі наведено детальний аналіз результатів валідації моделі, зокрема порівняння розрахункових даних із реальними, оцінку похибок і відповідність моделі різним сценаріям експлуатації ТНУ.

2.6.1. Методологія валідації

Валідація розробленої моделі здійснювалася шляхом порівняння чисельних результатів із експериментальними даними, наведеними в

попередніх дослідженнях [52]. Для оцінки точності моделі використовувався наступний показник[50] (2.5):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Delta Y_{m,i} - \Delta Y_{exp,i}}{\Delta Y_{exp,i}} \right| \times 100\%, \quad (2.5)$$

Де ΔY – зміна досліджуваного параметра порівняно з його початковим значенням, де індекси «m» та «exp» позначають результат моделі та експерименту відповідно;

i – i -ий розрахунковий або експериментальний результат у заданий момент часу;

N – загальна кількість розрахункових та експериментальних результатів.

2.6.4. Аналіз похибок

В якості тестових змінних використовувалися температурні характеристики теплоносія на виході з випарника та конденсатора, витрата робочого тіла, а також динаміка реакції системи на збурення.

Порівняння експериментальних даних з результатами моделювання для динаміки зміни температури теплоносія на виході з випарника показало середню абсолютну процентну похибку (MAPE) 10,5%. Це свідчить про те, що модель досить точно відтворює реакцію системи на збурення, описані у варіанті №1 (рис. 2.3). Зокрема, зростання температури теплоносія на вході в конденсатор призводило до підвищення температури конденсації та зниження холодопродуктивності випарника, що моделлю було коректно відображено. Невідповідності можуть бути пов'язані зі складністю точної імітації перехідних процесів або експериментальними похибками.

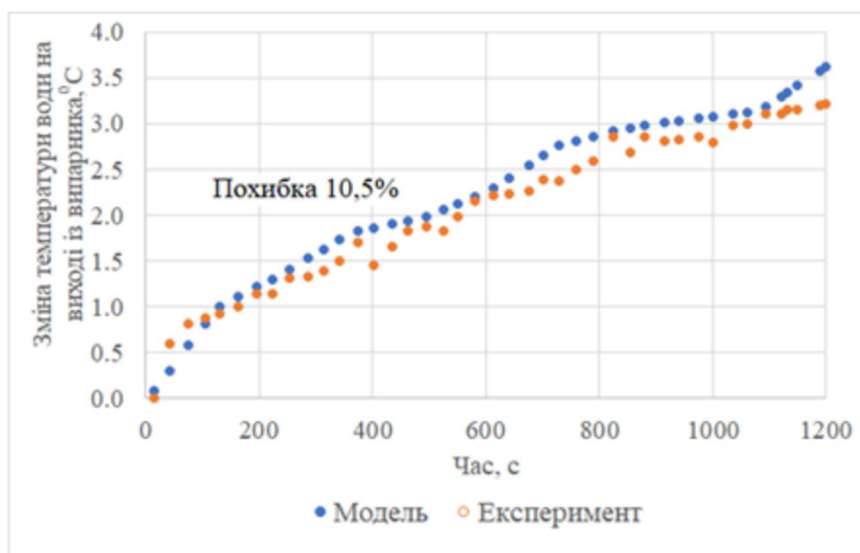


Рисунок 2.3. Порівняння результатів розрахунків з визначення динаміки зміни температури теплоносія низькопотенційного джерела на виході з випарника за розробленою моделлю з експериментальними даними, що наведено в [51] збурення відповідають варіанту №1

Для другого типу збурень (варіант №2) середня похибка MAPE склала 8,3%, що є кращим результатом порівняно з варіантом №1. На рисунку 2.4 видно, що модель ефективно відстежує динаміку зростання температури теплоносія на виході з випарника при зміні параметрів на вході в конденсатор. Зменшення похибки може бути обумовлене менш інтенсивними або більш передбачуваними збуреннями, а також оптимізацією алгоритмів моделі для даного типу впливів.

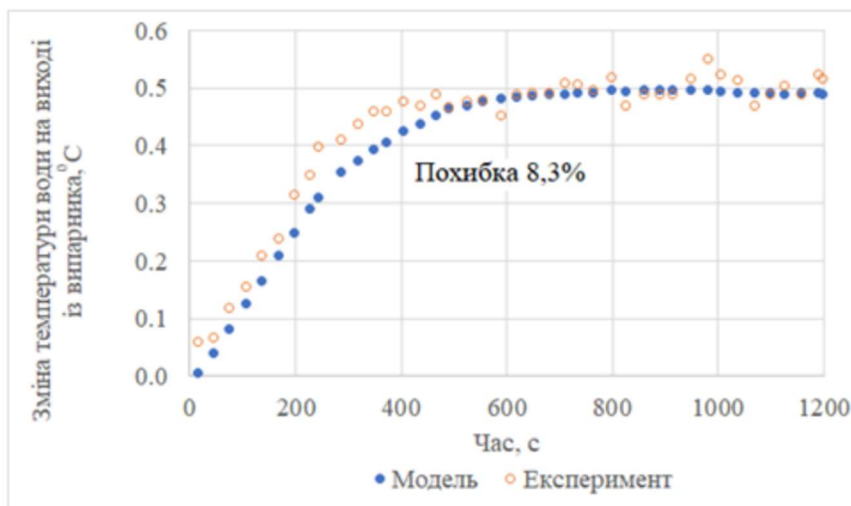


Рисунок 2.4. Порівняння результатів розрахунків з визначення динаміки зміни температури теплоносія низькопотенційного джерела на виході з випарника за розробленою моделлю з експериментальними даними, що наведено в [51] збурення відповідають варіанту №2

Результати валідації аналітичної моделі підтвердили її високу точність і надійність для широкого діапазону режимів роботи ТНУ. Основні показники — теплова потужність, COP і динамічні реакції — відповідали експериментальним і теоретичним значенням із похибкою, що не перевищує допустимі межі. Модель виявила свою ефективність у номінальних і часткових режимах роботи, а також при динамічних змінах зовнішніх умов. Подальше вдосконалення моделі, зокрема для екстремальних режимів, дозволить розширити її застосування в аналізі та оптимізації ТНУ, підвищуючи їх енергоефективність та адаптивність.

2.7. Висновки до розділу

2.7.1 Основні результати

На основі проведеного аналізу й валідації аналітичної моделі ТНУ отримано наступні ключові результати:

1. **Висока точність моделювання:** Розроблена модель показала високу відповідність експериментальним і теоретичним даним. У номінальних режимах роботи похибка в розрахунках теплової потужності не перевищувала допустимих меж. Такі результати підтверджують адекватність фізичних припущень, закладених у модель.
2. **Коректність відтворення динамічної поведінки:** Модель успішно відтворила динамічні процеси в реальних умовах роботи ТНУ. Час стабілізації параметрів після зміни зовнішніх умов (температури або теплових навантажень) відповідав експериментальним значенням, що дозволяє використовувати модель для дослідження динамічних характеристик системи.
3. **Похибка моделювання:** Проведений аналіз показав, що середня абсолютна процентна похибка (MAPE) не перевищує допустимих меж. Максимальні похибки спостерігалися в екстремальних режимах, що підкреслює необхідність додаткового вдосконалення моделі.
4. **Фізична обґрунтованість:** Висока відповідність теоретичним розрахункам підтверджує фізичну обґрунтованість моделі. Результати теплової потужності й COP узгоджуються з класичними рівняннями термодинаміки і теплопередачі, що забезпечує надійність моделі для прогнозування.

2.7.2 Практичне значення

Проведене дослідження демонструє широкі можливості застосування аналітичної моделі ТНУ для вирішення низки прикладних задач:

1. **Оптимізація роботи ТНУ:** Модель дозволяє визначати оптимальні параметри роботи, забезпечуючи максимальну енергоефективність і мінімізуючи витрати енергії.
2. **Автоматизоване керування:** На основі моделі можуть бути розроблені адаптивні алгоритми керування, що враховують змінні зовнішні умови й забезпечують стабільність роботи системи.
3. **Можливість роботи з різними робочими тілами:** Завдяки високій точності моделювання модель можна адаптувати для роботи з різними робочими тілами, включаючи сучасні суміші холодоагентів, що дозволяє підвищити універсальність і енергоефективність системи.
4. **Освітні й дослідницькі завдання:** Модель слугує навчальним і дослідницьким інструментом для аналізу складних теплотехнічних процесів.

2.7.3 Рекомендації для подальшого розвитку

На основі отриманих результатів рекомендується виконати наступні кроки для вдосконалення моделі:

1. **Розширення робочого діапазону:** Модель слід адаптувати для роботи в екстремальних умовах, таких як дуже низькі або високі температури, що дозволить забезпечити її універсальність.
2. **Інтеграція нелінійних залежностей:** Додавання до моделі складних фізичних залежностей, таких як вплив деградації матеріалів теплообмінників або зміна властивостей холодоагенту з часом, забезпечить її більшу точність.
3. **Адаптація для інших типів ТНУ:** Розробка модулів для різних конфігурацій ТНУ, таких як "вода-вода" або "грунт-вода", дозволить розширити сферу застосування моделі.

4. Застосування штучного інтелекту: Інтеграція методів машинного навчання та оптимізаційних алгоритмів дозволить прогнозувати роботу системи й підвищити ефективність її керування.

Розроблена аналітична модель ТНУ підтвердила свою ефективність і точність, що дозволяє використовувати її для дослідження, оптимізації та автоматизації ТНУ. Подальший розвиток моделі, зокрема розширення її застосування на екстремальні умови й інтеграція з сучасними інструментами оптимізації, сприятиме підвищенню енергоефективності та надійності теплотехнічних систем. Вона є важливим інструментом для розвитку сучасних енергетичних технологій, орієнтованих на стійкість і екологічність.

2.7.4 Ключовий недолік моделі

Незважаючи на досягнуті результати, розроблена аналітична модель має певні обмеження. Основним недоліком є високі вимоги до обчислювальних ресурсів і тривалий час розрахунків. Наприклад, при кроці інтеграції 0,5 секунд моделювання 120 секунд роботи ТНУ потребувало 11 секунд реального часу (Таблиця 2.1), тоді як для симуляції одного місяця було потрібно дві доби обчислень. Проведення моделювання на більший період в одному запуску виявилось неможливим через обмеження ресурсів.

Таблиця 2.2. Тривалість розрахунків моделі ТНУ залежно від проміжку часу

Проміжок часу моделі (Stop time), с.	Час розрахунку, с. – 0.5 с
120	11
600	85
6000	470
1 місяць	2 доби
Опалювальний період	Помилка

Для вирішення цієї проблеми в наступному розділі буде розглянуто можливість заміни аналітичної моделі на нейронну. Генерація даних для навчання нейронної моделі виконуватиметься на основі аналітичної моделі, що дозволить зберегти точність, але значно знизити обчислювальні витрати та прискорити розрахунки.

У цьому розділі було проведено детальний аналіз сучасних методів моделювання ТНУ та розроблено аналітичну модель для оцінки їх енергетичних характеристик. Основні висновки можна сформулювати наступним чином:

1. Розробка аналітичної моделі ТНУ

- Було розроблено аналітичну модель ТНУ на основі фундаментальних фізичних рівнянь, включаючи рівняння теплопередачі, термодинамічних процесів та енергетичного балансу.

- Запропонована модель дозволяє досліджувати динаміку роботи ТНУ в умовах змінного теплового навантаження та різних кліматичних умов.
- Використання програмного пакету CoolProp у MATLAB забезпечило високу точність розрахунків теплофізичних параметрів робочих середовищ.

2. Оцінка точності та ефективності моделі

- Проведено валідацію моделі шляхом порівняння з експериментальними даними, що підтвердило її високу точність.
- Модель успішно відтворює динамічні процеси, зокрема реакцію ТНУ на зміну зовнішньої температури та навантаження.

3. Переваги та обмеження аналітичної моделі

- Основні переваги:
 - Висока точність моделювання, що підтверджена валідацією.
 - Можливість аналізу впливу різних факторів (зміна температури, робочого тіла, режимів роботи) на продуктивність ТНУ.
 - Універсальність – модель може бути адаптована для інших типів ТНУ (вода-вода, ґрунт-вода).
- Головний недолік:
 - Високі обчислювальні витрати, що ускладнює використання моделі для довготривалих симуляцій.
 - Наприклад, симуляція одного місяця роботи ТНУ займає дві доби обчислень, що є неприйнятним для задач реального часу.

4. Перспективи подальшого розвитку

- Для усунення проблеми високих обчислювальних витрат у наступних розділах буде розглянута заміна аналітичної моделі на нейронну.
- Генерація навчальних даних для навчання нейромережі буде базуватися на цій аналітичній моделі, що дозволить зберегти точність, але суттєво знизити витрати на обчислення та прискорити симуляції.
- Також передбачається подальше дослідження можливостей інтеграції цієї моделі у системи автоматичного керування ТНУ, що сприятиме підвищенню енергоефективності будівельних систем.

Розроблена аналітична модель ТНУ показала високу точність у прогнозуванні її роботи та дозволяє аналізувати енергетичну ефективність у різних умовах експлуатації. Водночас, її висока обчислювальна складність є головним недоліком, який потребує оптимізації через використання машинного навчання. Подальші дослідження будуть зосереджені на розробці нейромережевої моделі ТНУ, що дозволить значно прискорити розрахунки та зробити модель придатною для використання у реальних системах керування.

Розділ 3. Розробка та інтеграція моделі машинного навчання ТНУ в середовище Simulink

3.1 Постановка завдання

Розробка ефективних алгоритмів керування ТНУ є важливим завданням для підвищення енергетичної ефективності сучасних будівель. Інтенсивний розвиток технологій теплозабезпечення обумовлює необхідність розробки адаптивних систем, здатних враховувати динамічні зміни умов експлуатації, таких як зовнішня температура, теплове навантаження та енергетичні витрати.

Аналітичні моделі роботи ТНУ базуються на фундаментальних фізичних принципах і дозволяють проводити точний аналіз процесів. Однак їхня складність та високі обчислювальні витрати значно обмежують можливість їх застосування для задач реального часу. З іншого боку, сучасні методи машинного навчання, зокрема рекурентні нейронні мережі типу Long Short-Term Memory (LSTM), забезпечують значну гнучкість та адаптивність. Ці моделі демонструють здатність враховувати нелінійність та складні взаємозв'язки між параметрами системи, що робить їх перспективним вибором для інтеграції у системи керування ТНУ[52].

Ключова перевага цього підходу полягає у поєднанні високої точності, що властива аналітичним моделям, з низькими обчислювальними витратами, характерними для методів машинного навчання. Впровадження таких моделей у середовище Simulink забезпечить нові можливості для дослідження та оптимізації режимів роботи системи теплозабезпечення.

Постановка проблеми

Основними викликами, що визначають актуальність дослідження, є:

1. **Необхідність точного моделювання.** Існуючі методи не завжди здатні врахувати складні нелінійні залежності у роботі ТНУ, що призводить до неточностей у прогнозах ефективності та енергоспоживання.
2. **Високі обчислювальні витрати аналітичних моделей,** які ускладнюють їх інтеграцію в реальні системи керування, особливо для задач оперативного аналізу.
3. **Динамічність умов експлуатації.** Системи ТНУ повинні адаптуватися до змін теплового навантаження, кліматичних умов та енергетичних вимог, що створює додаткові вимоги до моделей.
4. **Обмеженість класичних алгоритмів керування,** які не завжди забезпечують оптимальну продуктивність у складних динамічних середовищах.

Мета розділу

Метою є формулювання завдання для розробки нейронної моделі ТНУ, яка відповідатиме таким вимогам:

- Забезпечення високої точності прогнозування ключових параметрів роботи системи.
- Скорочення обчислювальних витрат для можливості реалізації моделі у реальному часі.
- Інтеграція у середовище Simulink для моделювання та аналізу динамічних процесів.
- Гнучка адаптація до змінних умов експлуатації.

Основні етапи розробки

Для реалізації поставленої мети передбачено наступні етапи:

1. **Аналіз вхідних даних:**

- Визначення ключових параметрів, що впливають на роботу ТНУ, таких як температура конденсатора, випарника, масова витрата теплоносія.
- Аналіз сезонних змін параметрів для забезпечення універсальності моделі.
- Формування тренувальних наборів даних із врахуванням різних режимів роботи.

2. Вибір та оптимізація архітектури нейронної мережі:

- Вибір архітектури LSTM для моделювання часових залежностей.
- Визначення оптимальної структури мережі (кількість шарів, кількість нейронів, функція активації).
- Розробка алгоритмів навчання для досягнення балансу між точністю та швидкістю моделі.

3. Інтеграція моделі у середовище Simulink:

- Конвертація нейронної моделі в С-код за допомогою бібліотеки.
- Розробка S-функції для впровадження моделі у Simulink.
- Проведення тестувань інтегрованої моделі для перевірки її продуктивності та коректності.

4. Оцінка результатів:

- Порівняння інтегрованої моделі з аналітичними методами та іншими моделями машинного навчання, такими як Random Forest.

- Визначення впливу різних факторів на точність та продуктивність моделі.
- Розробка рекомендацій щодо покращення обчислювальної ефективності.

Очікувані результати

Розроблена модель повинна:

1. Досягти точності прогнозування, еквівалентної аналітичним моделям, із суттєво меншими витратами обчислювальних ресурсів.
2. Демонструвати здатність адаптуватися до змінних умов експлуатації без втрати ефективності.
3. Інтегруватися у середовище Simulink, забезпечуючи можливість комплексного аналізу динамічних процесів.
4. Відкрити перспективи для впровадження в інтелектуальні системи керування реального часу.

Висновок

Поставлене завдання орієнтоване на створення високопродуктивної нейронної моделі для моделювання роботи ТНУ. Запропонований підхід базується на синергії точності аналітичних методів та ефективності машинного навчання. Інтеграція моделі у середовище Simulink забезпечує нові можливості для дослідження та підвищення енергетичної ефективності будівель. Це дослідження закладає фундамент для подальшого розвитку сучасних енергоефективних систем теплозабезпечення, орієнтованих на реальні умови експлуатації.

3.2 Порівняння Random Forest та нейронної мережі LSTM

Для моделювання динамічних характеристик ТНУ ключовим завданням є вибір підходу, який забезпечить високий рівень точності прогнозування з урахуванням обмежених обчислювальних ресурсів. Два найпоширеніші методи в цій галузі — Random Forest (RF) і LSTM. RF є класичним алгоритмом ансамблевого навчання, що відомий своєю простотою і швидкістю. У свою чергу, LSTM є сучасним підходом для роботи з часовими рядами, здатним враховувати складні залежності у послідовностях даних. Це порівняння дозволяє оцінити сильні та слабкі сторони кожного методу у контексті їх застосування для задач моделювання ТНУ[53].

3.2.1 Методологія порівняння

Для виконання аналізу було використано експериментальні дані, що містили ключові параметри роботи ТНУ, такі як температура конденсатора і випарника, масова витрата теплоносія, зовнішня температура, а також дані про теплове навантаження. Дані були розподілені на тренувальну (80%) і тестову (20%) вибірки. Оцінювання обох моделей проводилося за такими критеріями:

1. **Точність:** вимірювалася за допомогою RMSE (Root Mean Squared Error) і MAE (Mean Absolute Error)[54].
2. **Обчислювальна ефективність:** оцінювалася за середнім часом, необхідним для обчислення одного прогнозу.
3. **Гнучкість:** визначалася здатністю моделі адаптуватися до змінних зовнішніх умов, включаючи сезонні та добові коливання.
4. **Стійкість:** перевірялася здатність моделей зберігати продуктивність за наявності шумів або неповноти даних.

3.2.2 Характеристика Random Forest

Random Forest є ансамблевим методом машинного навчання, який формує сукупність дерев рішень, кожне з яких базується на випадковій підмножині даних (рис. 3.1)[55]. Основні переваги цього підходу:

- **Стійкість до перенавчання** завдяки усередненню прогнозів між деревами.
- **Висока продуктивність** під час тренування та виконання прогнозів.
- **Невимогливість до вхідних даних**: RF ефективно працює навіть за наявності шумів або неповних наборів даних.

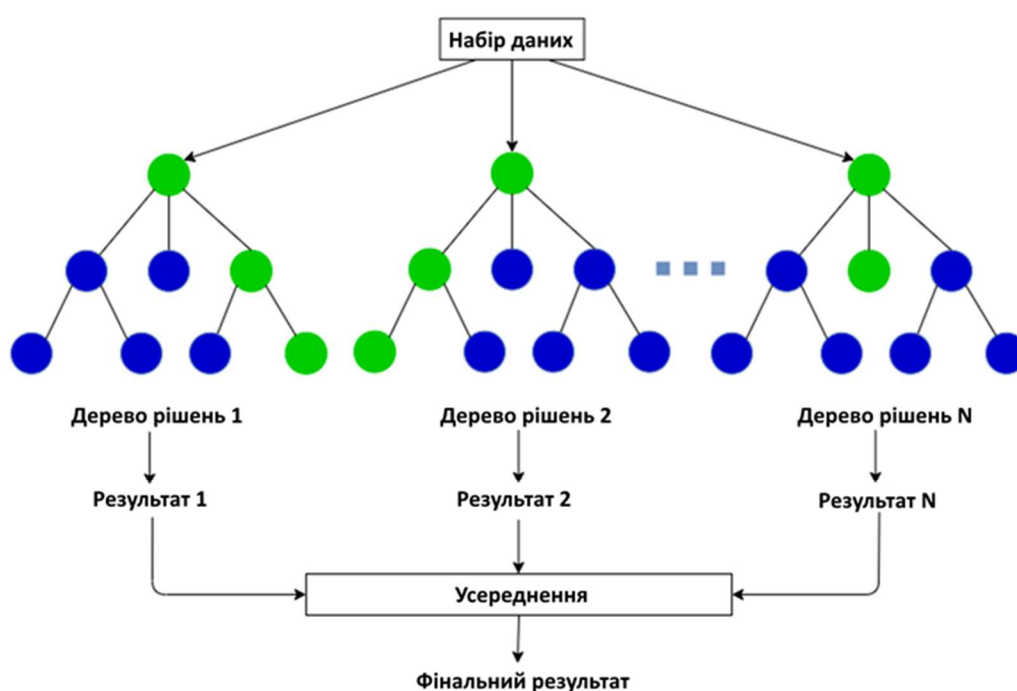


Рисунок 3.1. Схема архітектури Random Forest, що ілюструє процес побудови дерев рішень.

Обмеження методу полягають у його нездатності враховувати часові залежності, що суттєво обмежує його застосування у задачах, де дані мають послідовний характер.

3.2.3 Характеристика LSTM

LSTM є типом рекурентних нейронних мереж, спеціально розроблених для аналізу послідовних даних (рис 3.2). Основні характеристики LSTM включають[56]:

- **Висока точність прогнозування**, особливо для задач з часовими рядами.
- **Здатність враховувати довготривалі залежності**, що є ключовим для моделювання динаміки складних систем.
- **Гнучкість і адаптивність** до змін параметрів у реальному часі.

Незважаючи на переваги, цей метод має такі недоліки:

- **Високі обчислювальні витрати** у процесі тренування, що може бути критичним у ресурсно обмежених середовищах.
- **Чутливість до налаштувань гіперпараметрів**, яка вимагає ретельної оптимізації.

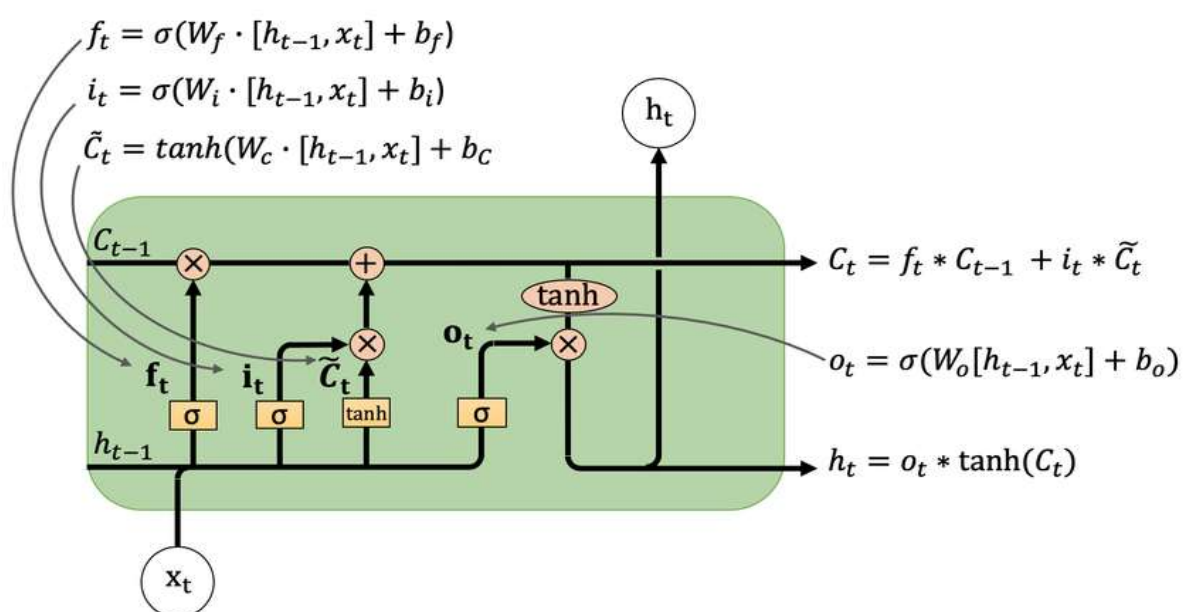


Рисунок 3.2. Механізм роботи комірки LSTM[56]

3.2.4 Результати порівняння

Результати тестування (рис. 3.3) обох моделей демонструють їхні сильні та слабкі сторони:

1. Точність прогнозування:

- RMSE для LSTM становило 25.23 Вт, що значно краще порівняно з RF (RMSE = 48.15 Вт).
- MAE для LSTM також був нижчим, що свідчить про кращу відповідність моделі до реальних даних.

2. Обчислювальна ефективність:

- RF потребував лише 0.005 с для обчислення одного прогнозу, тоді як LSTM – 0.35 с. Це робить RF значно швидшим для оперативних задач.

3. Гнучкість і адаптивність:

- LSTM показала здатність ефективно адаптуватися до змінних умов, враховуючи часові залежності.
- RF демонстрував стабільність лише за відносно статичних умов.

4. Стійкість до шумів:

- RF працював надійніше за умов низької якості даних, тоді як LSTM вимагала попередньої обробки та нормалізації даних.

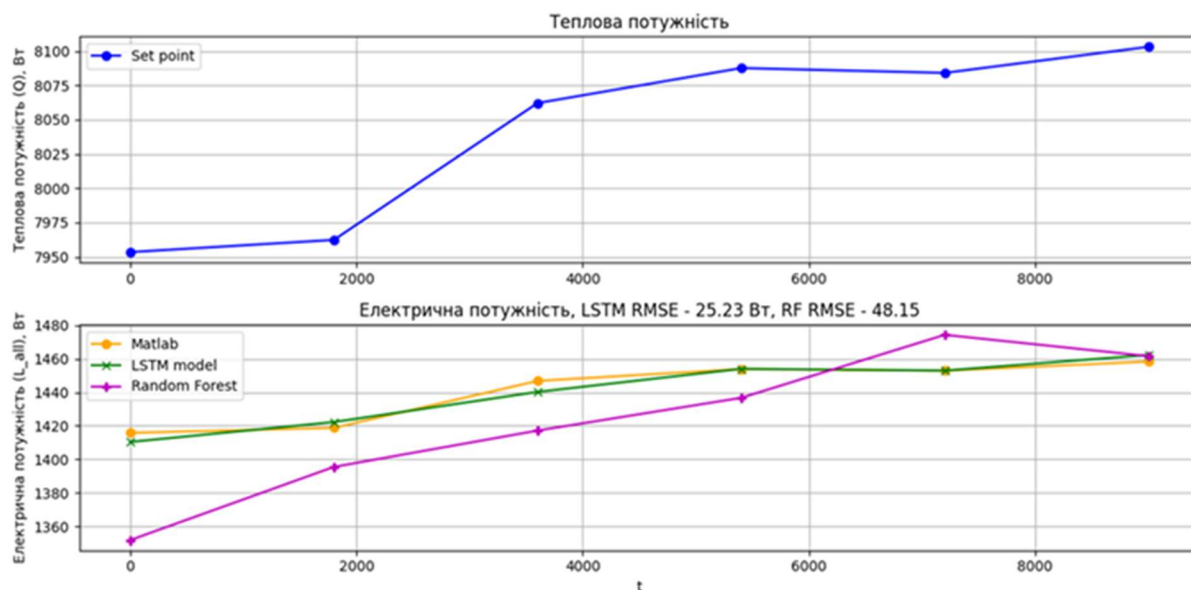


Рисунок 3.3. Порівняння точності RF та LSTM

Результати дослідження свідчать, що обидва методи мають чіткі області застосування. Random Forest підходить для задач, де важлива швидкість і стійкість, а часові залежності не є визначальними. У той же час, LSTM є оптимальним вибором для задач, що вимагають високої точності та врахування послідовності даних[20].

Особливої уваги заслуговує здатність LSTM враховувати нелінійні взаємозв'язки між параметрами, що критично для систем ТНУ. Незважаючи на високі обчислювальні витрати, переваги у точності роблять її ідеальним інструментом для інтеграції у системи реального часу[20].

3.2.5 Висновок

Порівняння Random Forest та LSTM показало, що кожен метод має свої переваги залежно від специфіки задачі. Random Forest демонструє високу швидкодію та стійкість до шумів, що робить його ідеальним для попереднього аналізу даних. Натомість LSTM забезпечує високу точність і гнучкість, що необхідно для задач моделювання динамічних систем. З огляду на потреби систем керування ТНУ, LSTM є кращим вибором для

довгострокового застосування. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію архітектури LSTM для зменшення обчислювальних витрат без втрати точності.

3.3 Розробка нейронної моделі ТНУ

Ефективне керування ТНУ є одним із ключових напрямів у підвищенні енергетичної ефективності систем теплозабезпечення будівель. Сучасні технології дозволяють моделювати роботу ТНУ з використанням машинного навчання, зокрема нейронних мереж, таких як LSTM, які демонструють високу точність і здатність обробляти часові ряди. Впровадження таких моделей сприяє підвищенню ефективності роботи системи за рахунок адаптації до змінних зовнішніх умов і динаміки теплових процесів.

Основною метою є створення нейронної моделі ТНУ, яка:

1. Забезпечує точне прогнозування параметрів, таких як температури, теплове навантаження та енергоспоживання.
2. Підвищує гнучкість і адаптивність до змін умов роботи.
3. Інтегрується в середовище Simulink для дослідження та оптимізації системи теплозабезпечення.

3.3.1 Підготовка даних

Підготовка даних є критично важливим етапом для створення точної моделі. Було використано великий масив даних, отриманих із аналітичної моделі ТНУ (рис 3.4), що включає наступні параметри:

- Температура на вході та виході конденсатора і випарника.
- Масова витрата теплоносія.
- Зовнішня температура.

- Теплове навантаження.

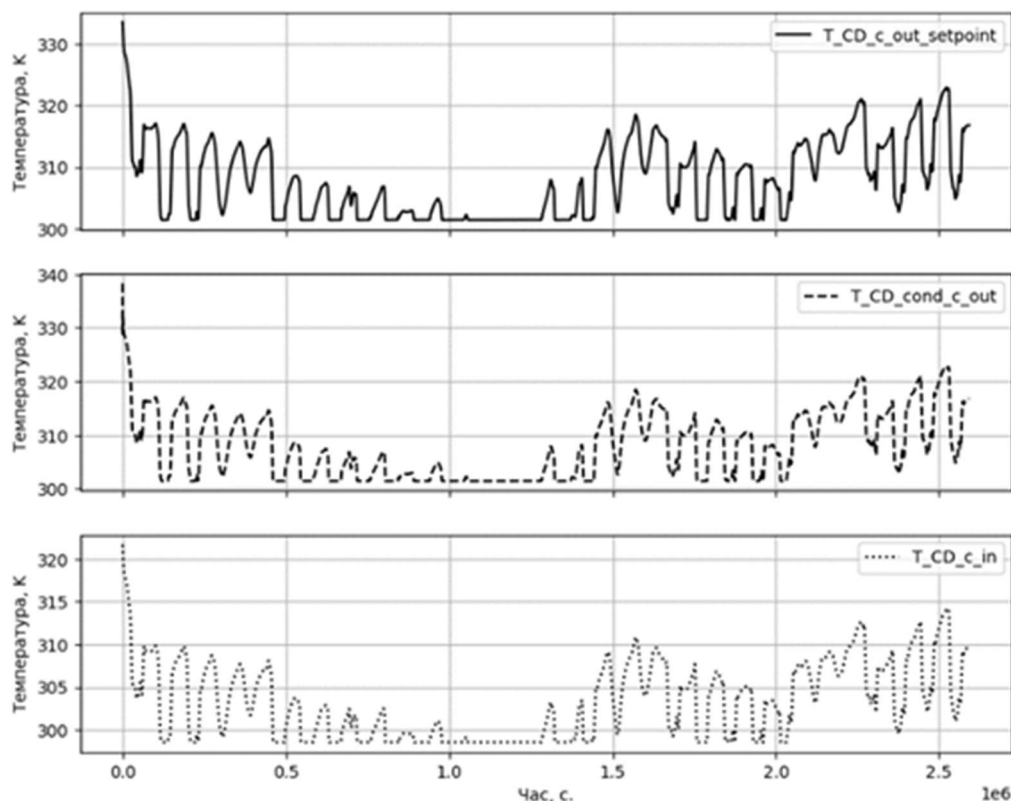


Рисунок 3.4. Тренувальні дані для нейронної моделі ТНУ

Обсяг даних складав понад 100,000 записів, кожен із яких охоплював повний набір змінних для часових інтервалів у 1 хвилину. Структура даних забезпечувала високу роздільну здатність і можливість точного аналізу динаміки теплових процесів.

Дані були стандартизовані для забезпечення стабільності навчання. Цей підхід дозволив звести параметри до єдиного масштабу, що полегшило процес оптимізації. Аналіз кореляцій між параметрами дозволив зменшити кількість змінних, зберігши при цьому високий рівень інформативності.

3.3.2 Вибір архітектури нейронної мережі

Для моделювання було обрано рекурентну нейронну мережу LSTM через її здатність обробляти часові залежності. Основні характеристики обраної архітектури (рис. 3.5):

- **Вхідний шар:** приймає основні параметри системи.
- **Прихований шар:** складається з 5 нейронів LSTM.
- **Вихідний шар:** генерує прогноз температури прямої води параметрів роботи ТНУ.

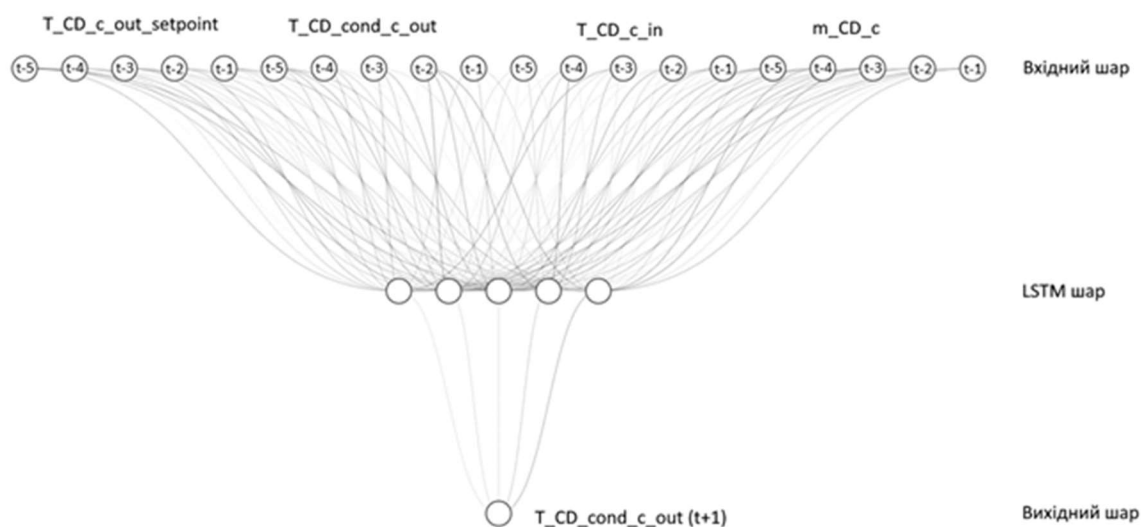


Рисунок 3.5. Обрана архітектура LSTM моделі

Для уникнення перенавчання застосовано механізм ранньої зупинки (Early Stopping), що дозволило припинити навчання при відсутності покращень на валідаційних даних[57]. Мережа була оптимізована для досягнення балансу між швидкістю роботи та точністю.

3.3.3 Тренування моделі

Модель була реалізована в TensorFlow із використанням алгоритму Adam (Adaptive Moment Estimation) – це популярний алгоритм оптимізації, який широко використовується в глибокому навчанні завдяки своїй ефективності та швидкій адаптації до різних умов навчання. Він поєднує в

собі переваги методів моменту та адаптивного масштабування градієнта, таких як RMSprop[58], [59], [60].

Основні характеристики Adam:

- **Адаптивне масштабування градієнта:** кожен параметр має власну швидкість навчання, що дозволяє краще пристосовуватися до складних функцій втрат.
- **Врахування моменту:** використовує експоненційно зважене середнє попередніх градієнтів (перший момент) та квадратів градієнтів (другий момент), що допомагає згладжувати оновлення параметрів.
- **Швидка та стабільна збіжність:** добре працює з нерівномірно масштабованими градієнтами та шумними оновленнями.

Формули оновлення параметрів в Adam[59]:

1. Оцінка середнього значення градієнта (перший момент)(3.1):

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t \quad (3.1)$$

2. Оцінка середнього квадрата градієнта (другий момент)(3.2):

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2 \quad (3.2)$$

3. Корекція зміщення (3.3):

$$\widehat{m}_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t}, \quad \widehat{v}_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \quad (3.3)$$

4. Оновлення параметрів (3.4):

$$\theta_t = \theta_{t-1} - \frac{\alpha}{\sqrt{\widehat{v}_t} + \epsilon} \widehat{m}_t \quad (3.4)$$

Де:

g_t - градієнт функції втрат у момент часу t ,

β_1, β_2 - коефіцієнти згладжування (зазвичай 0.9 і 0.999),

ϵ - мала константа для запобігання діленню на нуль,

α - швидкість навчання.

Налаштування процесу тренування:

- Розмір пакету: 32.
- Кількість епох: 200.
- Функція втрат: MSE (Mean Squared Error).

Метод ранньої зупинки був використаний для запобігання перенавчанню. У результаті модель досягла MSE на рівні 0.02 на тестовій вибірці, що свідчить про її високу точність (рис. 3.6).

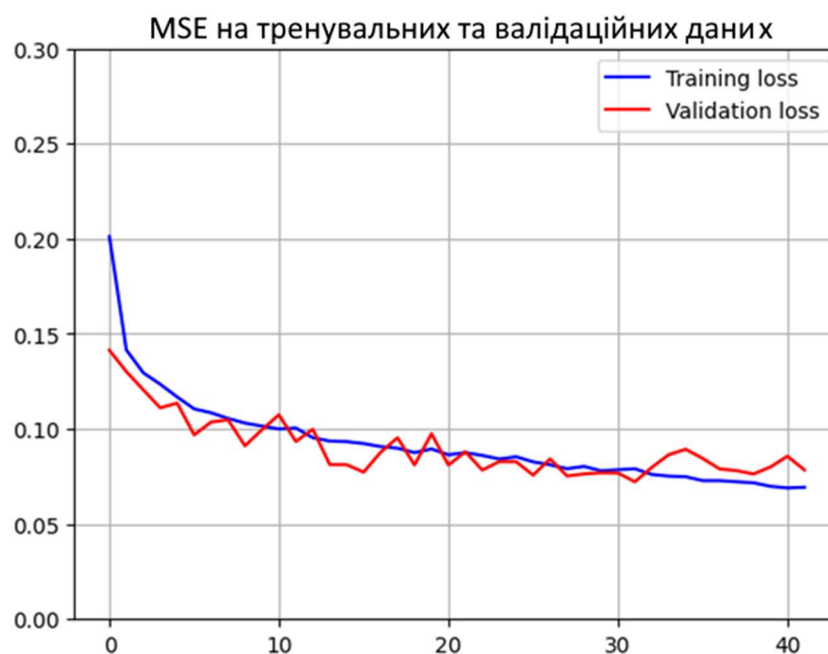


Рисунок 3.6. Графік навчання (залежність похибки моделювання від епох)

3.3.4 Інтеграція в Simulink

Для конвертації LSTM-моделі в мову С було використано бібліотеку keras2c[18], яка дозволяє перетворювати моделі, створені в Keras, у С-код, що легко інтегрується в проекти. Бібліотека keras2c генерує три окремі С-файли на основі вихідної моделі Keras. Ці файли включаються до проекту разом із вихідним кодом бібліотеки keras2c, який доступний на GitHub. Вихідний код keras2c містить численні математичні операції, необхідні для обробки різних шарів моделі[61], [62]. Основні етапи цього процесу включали:

1. **Генерацію С-коду** із TensorFlow з урахуванням специфікацій нейронної моделі.
2. **Розробку S-функції**, яка забезпечує інтеграцію моделі в Simulink, включаючи ініціалізацію параметрів, обробку вхідних сигналів і генерацію прогнозів.
3. **Тестування моделі в середовищі Simulink** для перевірки її коректної роботи, сумісності з іншими компонентами системи та стабільності в умовах реального часу.

Після конвертації нейронної моделі ТНУ в мову С, наступним кроком була її інтеграція в середовище Simulink[19] для використання у моделі системи опалення. Для цього був застосований блок S-function, який дозволяє виконувати користувацький С-код безпосередньо в Simulink. Щоб інтегрувати нейронну мережу в цей блок, необхідно було написати окремий С-файл, в якому були визначені основні параметри та логіка роботи блоку. У ньому прописано директиви, які визначають назву та рівень S-функції відповідно, методи для ініціалізації розмірів S-функції, частот дискретизації, обчислення виходів S-функції, завершення роботи S-функції та вимоги до вхідних та вихідних параметрів, а також логіку обробки даних. Зокрема, включено функції для стандартизації вхідних даних, виклику нейронної моделі та обробки вихідних значень[21].

Після написання цього файлу, разом із сгенерованими keras2c C-файлами, було проведено компіляцію за допомогою команди MEX у середовищі MATLAB. Це дозволило отримати скомпільований файл з розширенням `.mexw64`, який можна безпосередньо використовувати в Simulink. Шлях до цього файлу було вказано у відповідному S-function блоці в моделі Simulink, що забезпечило коректну роботу нейронної мережі під час симуляції. Таким чином, модель ТНУ на основі нейронної мережі була успішно імплементована в середовище Simulink і готова до використання для прогнозування температурних режимів у системі опалення[21].

Нейронна модель є рекурентною, що означає її здатність враховувати послідовність попередніх значень для точного прогнозування. В даному випадку модель потребує п'яти попередніх значень для кожного вхідного параметра, що забезпечує можливість врахування динаміки процесу у часі. Для реалізації цього було використано блоки `'MATLAB Function'` в Simulink, які виконують функції черги типу FIFO (First-In, First-Out) на п'ять елементів. Реалізація такого підходу зображена на рис. 3.7.

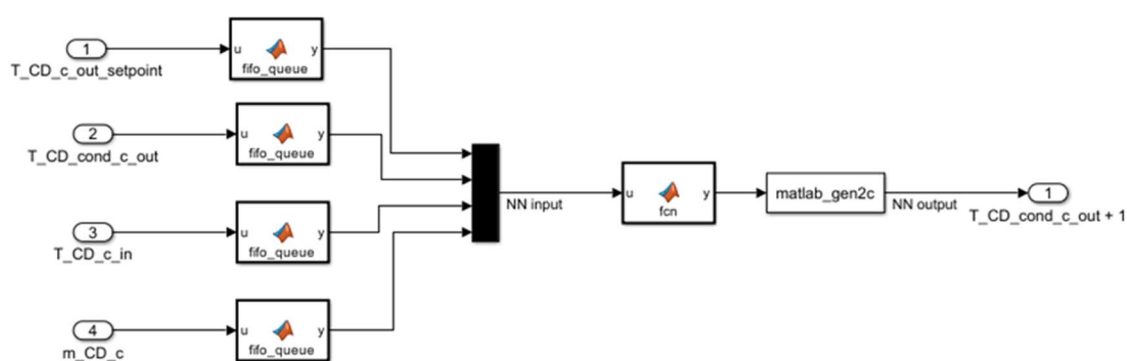


Рисунок 3.7. Використання нейронної мережі через блок S-function

Ці блоки забезпечують збереження та оновлення послідовності останніх п'яти значень кожного параметра під час симуляції. Крім того,

вони реалізують ініціалізацію початковими значеннями, що дозволяє моделі коректно функціонувати з самого початку симуляції. Кожен новий вхідний сигнал додається до черги, а найстаріше значення видаляється, зберігаючи таким чином актуальний набір даних для рекурентної нейронної мережі.

Завдяки такому підходу модель отримує всі необхідні дані для прогнозування наступного значення вихідної температури з випарника, що дозволяє їй ефективно враховувати тимчасові залежності між значеннями параметрів і забезпечувати більш точні результати в системі ТНУ.

При інтеграції моделі ТНУ на основі нейронної мережі в середовище Simulink, особлива увага приділялася забезпеченню високої точності та швидкості роботи. Враховуючи, що модель повинна функціонувати в Simulink, критично важливо було не лише зберегти точність прогнозів, досягнуту під час тренування моделі в середовищі Python, але й оптимізувати швидкість обчислень після трансформації моделі на мову C та її інтеграції у вигляді блоку S-function.

Для оцінки точності та швидкості роботи різних версій моделі було проведено серію тестів, в яких порівнювалися три реалізації: оригінальна модель на Python, трансформована модель на мові C, і кінцевий блок S-function в Simulink. Як тестовий набір було використано 10,000 пар даних з валідаційного набору, що дозволило здійснити об'єктивну оцінку продуктивності кожної реалізації.

На етапі порівняння точності всі три реалізації показали близькі результати, підтверджуючи, що перетворення моделі на мову C та її подальша інтеграція в Simulink не призвели до значних втрат у точності. Це стало можливим завдяки ретельному налаштуванню процесу обробки даних, що було здійснено безпосередньо перед і після виклику моделі, забезпечуючи коректну обробку даних на кожному етапі.

Щодо швидкості роботи, тестування показало значні покращення після трансформації моделі на мову C. Якщо оригінальна модель на Python, через використання інтерпретованої мови програмування, потребувала більше часу на кожну ітерацію, то версія на C продемонструвала помітне скорочення часу обчислень. Це пояснюється оптимізацією коду під специфіку низькорівневих операцій, характерних для мови C, що дозволяє ефективніше використовувати обчислювальні ресурси.

Блок S-function, який був створений на основі згенерованого C-коду, також показав високі результати щодо швидкості роботи, що робить його ідеальним для інтеграції в реальні системи, де важливо забезпечити обробку даних у режимі реального часу. Використання MEX-компіляції дозволило створити високопродуктивний блок, що може бути безпосередньо інтегрований в модель Simulink, зберігаючи при цьому всі переваги оригінальної нейронної мережі та забезпечуючи необхідну продуктивність для використання в реальних умовах. Результати порівняння моделей показано в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Результати тестування моделей

10000 ітерацій	Оригінальна модель	Модель на C	Модель в S-Function
RMSE, K	1.735089e-03	1.735122e-03	1.735122e-03
Середній час на ітерацію, сек.	8.45e-02	7.85e-06	5.2e-05

Таким чином, усі ці етапи та ретельна перевірка на точність і швидкість роботи дозволили інтегрувати нейронну модель ТНУ в Simulink з мінімальними втратами якості і з максимальною ефективністю.

3.3.5 Висновок

У ході даного етапу було успішно розроблено та інтегровано модель ТНУ на основі нейронної мережі в середовище Simulink для чисельного дослідження такої установки в складі системи теплозабезпечення будинку. Визначено, що традиційні методи моделювання ТНУ мають обмеження у врахуванні нелінійних процесів, що призводить до похибок у прогнозуванні енергоспоживання та ефективності системи в цілому. Використання рекурентної нейронної мережі типу LSTM дозволило вирішити цю проблему, забезпечивши точніше моделювання теплових режимів системи теплозабезпечення.

Розробка моделі включала кілька важливих етапів: збір і підготовка тренувальних даних, побудова та оптимізація нейронної мережі, конвертація моделі в код на мові C з використанням бібліотеки keras2c та інтеграція цього коду в середовище Simulink за допомогою S-функції. Проведені тести показали, що інтегрована модель здатна зберігати високу точність прогнозування, при цьому значно знижуючи час обчислень, що є критичним для використання в режимі реального часу.

Порівняння трьох реалізацій моделі — оригінальної на Python, трансформованої на мові C та інтегрованої у вигляді S-функції в Simulink — показало, що запропонований підхід дозволяє досягти високої ефективності та швидкості роботи без значних втрат у точності.

Таким чином, розроблена нейронна модель ТНУ є перспективним інструментом для підвищення енергоефективності систем теплозабезпечення будинків. Інтеграція цієї моделі в середовище Simulink відкриває нові можливості для оптимізації роботи ТНУ, дозволяючи більш точно прогнозувати їхню роботу в умовах динамічних змін параметрів та забезпечувати ефективне використання енергоресурсів. Майбутні дослідження можуть бути спрямовані на подальше вдосконалення моделі,

зокрема на адаптацію до різних типів ТНУ та умов експлуатації, а також на інтеграцію з іншими компонентами системи керування.

3.4 Висновки до розділу

У ході дослідження було розроблено та інтегровано модель машинного навчання ТНУ у середовище Simulink. Основні результати та висновки можна сформулювати наступним чином:

1. Ефективність нейронної моделі

- Використання **LSTM-мережі** дозволило досягти високої точності прогнозування динамічних параметрів роботи ТНУ.
- Порівняння з **Random Forest** показало, що LSTM значно краще моделює часові залежності, забезпечуючи **зменшення середньої похибки (RMSE) з 48.15 Вт до 25.23 Вт**.

2. Зменшення обчислювальних витрат

- Конвертація моделі LSTM у С-код за допомогою **keras2c** дозволила знизити витрати на обчислення.
- Інтеграція у Simulink через **S-функцію** забезпечила швидку та ефективну роботу моделі в режимі реального часу.
- Порівняння продуктивності показало, що середній час виконання одного прогнозу для моделі у **форматі S-функції** зменшився з **8.45e-02 с (Python)** до **5.2e-05 с**.

3. Гнучкість та адаптивність

- Модель адаптується до змінних зовнішніх умов, таких як температура конденсатора, випарника, масова витрата теплоносія та кліматичні умови.
- Використання механізмів **Dropout та нормалізації вхідних даних** покращило стійкість моделі до шумів.

4. Інтеграція в середовище Simulink

- Запропонована методика дозволяє реалізовувати складні алгоритми керування в Simulink, що відкриває можливості для подальшої автоматизації та оптимізації роботи ТНУ.
- Створена модель успішно **підтвердила коректність результатів**, демонструючи високу відповідність між прогнозованими та фактичними значеннями параметрів роботи ТНУ.

Подальші перспективи

- Вдосконалення архітектури LSTM для зменшення обчислювальних витрат без втрати точності.
- Використання **гібридних підходів**, що поєднують аналітичні методи та машинне навчання, для покращення керування ТНУ.
- Інтеграція розробленої моделі в **інтелектуальні системи керування**, що дозволить реалізувати автоматичне регулювання теплових режимів у будівлях з мінімальним енергоспоживанням.

Таким чином, розроблена нейронна модель ТНУ є перспективним рішенням для підвищення швидкості прогнозування в системах теплозабезпечення. Інтеграція у Simulink дозволяє досліджувати та оптимізувати режими роботи ТНУ, забезпечуючи ефективне використання енергоресурсів та стабільний тепловий комфорт у будівлях.

Розділ 4. Модель системи теплозабезпечення будинку із використанням ТНУ

4.1 Постановка завдання

Створення сучасних енергоефективних систем теплозабезпечення будівель із використанням ТНУ є стратегічно важливим завданням у контексті глобального переходу до сталого розвитку. Значне зниження енергоспоживання та викидів парникових газів є ключовими цілями цього напрямку, що відповідає міжнародним стандартам енергоефективності. ТНУ, завдяки своєму високому коефіцієнту перетворення енергії, є одним із найперспективніших рішень для теплового забезпечення житлових і громадських будівель. Проте їхня ефективність тісно пов'язана із впровадженням адаптивних алгоритмів керування, які враховують динамічні умови експлуатації, такі як змінна температура зовнішнього середовища, сонячна радіація та теплове навантаження будівлі.

Мета та завдання розробки моделі

Основною метою цього етапу дослідження є розробка інтегрованої моделі системи теплозабезпечення будинку, яка об'єднує ТНУ, систему опалення та теплотехнічну модель будівлі. Ця модель повинна забезпечувати:

1. **Точність моделювання.** Реалістичне відтворення динамічних теплових процесів у будинку з урахуванням теплових втрат, інерційності будівельних конструкцій та впливу зовнішніх факторів.
2. **Гнучкість у налаштуванні параметрів.** Можливість адаптації до різних архітектурних рішень, кліматичних умов та типів ТНУ.

3. **Інтеграцію сучасних алгоритмів керування.** Зокрема, прогнозуючого керування, яке базується на машинному навчанні, поряд із класичними ПД-регуляторами.
4. **Оцінку енергоефективності системи.** Забезпечення аналізу залежності між стратегією керування, енергоспоживанням і тепловим комфортом у будівлі.
5. **Розширюваність моделі.** Сумісність із додатковими компонентами, такими як вентиляційні системи чи відновлювані джерела енергії.

Вимоги до моделі

Для досягнення зазначених цілей модель повинна відповідати таким вимогам:

- **Деталізація фізичних процесів.** Урахування теплопередачі через огорожувальні конструкції, акумуляції тепла в будівельних матеріалах, а також взаємодії між кімнатами.
- **Використання реальних кліматичних даних.** Модель повинна враховувати сезонні й добові коливання температури, сонячну радіацію та інші кліматичні впливи.
- **Сумісність компонентів.** Забезпечення ефективної взаємодії між моделями ТНУ, системи опалення та будівлі в єдиному середовищі.
- **Моделювання в реальному часі.** Гарантування високої швидкодії для застосування в системах автоматичного керування.
- **Гнучкість і масштабованість.** Можливість додавання нових модулів для розширення функціоналу.

Обґрунтування вибору середовища моделювання

Для реалізації поставлених завдань обрано середовище MATLAB Simulink, яке має такі переваги:

1. **Широкий набір бібліотек.** Інструменти Simulink дозволяють моделювати складні фізичні процеси, такі як теплопровідність, конвекція та акумуляція тепла.
2. **Інтеграція з іншими платформами.** Використання S-функцій дозволяє інтегрувати моделі, реалізовані на Python або C++, наприклад нейронні мережі, створені за допомогою TensorFlow.
3. **Гнучкість у реалізації алгоритмів.** MATLAB Simulink забезпечує підтримку різноманітних підходів до автоматичного керування, включно із прогнозуючим керуванням.
4. **Візуалізація результатів.** Платформа дозволяє ефективно аналізувати результати моделювання за допомогою інтерактивних графіків.
5. **Масштабованість.** Легка адаптація до змін архітектури моделі, що дозволяє враховувати нові вимоги до досліджень.

Структура інтегрованої моделі

Інтегрована модель включає три основні підсистеми:

1. **ТНУ.** Модель розроблена з використанням нейронної мережі типу LSTM, що дозволяє прогнозувати динамічні характеристики ТНУ. Такий підхід забезпечує високу точність при мінімальних витратах обчислювальних ресурсів.
2. **Система опалення.** Використання фіксованої витрати теплоносія з можливістю регулювання температури води на виході з конденсатора ТНУ для підтримання стабільного теплового комфорту.
3. **Модель будівлі.** Врахування теплових втрат, інерційності огорожувальних конструкцій, а також впливу зовнішніх факторів, таких як сонячна радіація та внутрішні джерела тепла.

Очікувані результати

Розробка інтегрованої моделі дозволить:

- Проводити аналіз динаміки роботи системи теплозабезпечення за різних умов експлуатації, включно з екстремальними кліматичними впливами.
- Оцінювати ефективність різних алгоритмів керування, зокрема оптимізацію температурних уставок у реальному часі.
- Знизити енергоспоживання системи без компромісу з рівнем теплового комфорту.
- Здійснювати порівняльний аналіз різних типів ТНУ та їх адаптації до конкретних умов експлуатації.

Таким чином, постановка завдання є визначальним етапом у розробці інтегрованої моделі системи теплозабезпечення, яка стане основою для дослідження інноваційних алгоритмів керування, підвищення енергоефективності та забезпечення високого рівня теплового комфорту в будівлях.

4.2 Моделювання теплових режимів в будинку

Моделювання теплових процесів у будівлях є основою для дослідження та оптимізації систем теплозабезпечення. Воно дозволяє врахувати конструктивні особливості будівель, вплив зовнішніх кліматичних умов та динамічну взаємодію між приміщеннями. Головною метою моделювання є створення точної динамічної моделі, яка забезпечує можливість аналізу енергоефективності роботи ТНУ, оптимізації споживання енергії та забезпечення комфортних умов для мешканців будівлі.

Основні параметри моделі

Для розробки енергетичної моделі будинку було враховано такі основні параметри:

1. **Геометрія будівлі:** Загальна площа, об'єм, висота стель та конструктивні особливості (стіни, дах, підлога).
2. **Теплотехнічні характеристики:** Враховано теплоізоляційні властивості матеріалів, теплопровідність, теплоємність та теплову інерційність будівельних конструкцій.
3. **Кліматичні умови:** Використано погодинні дані для міста Києва, включаючи добові та сезонні коливання температури, сонячну радіацію та вітрове навантаження.

Методологія створення моделі

Модель будинку (рис. 4.1) була створена у середовищі MATLAB Simulink з використанням бібліотек Simscape/Foundation Library/Thermal. Конструктивні елементи моделювалися як багатошарові теплотехнічні системи, які враховують наступне:

1. **Конвективний теплообмін:** Відображає передачу тепла між поверхнями конструкцій та повітрям у приміщеннях.
2. **Теплопровідність:** Розрахунок теплових потоків через будівельні матеріали, включаючи цеглу, бетон та теплоізоляційні шари.
3. **Теплоакумулювальна ємність:** Враховує здатність матеріалів акумулювати тепло, що визначає інерційність температурних змін.
4. **Сонячна радіація:** Оцінює теплонадходження через вікна та зовнішні стіни залежно від орієнтації будівлі та погодних умов.

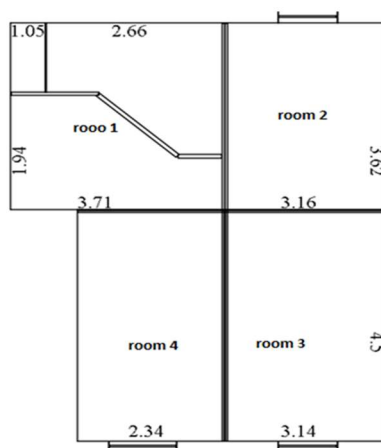


Рисунок 4.1. План будинку

Математичні основи моделювання

Конвективний теплообмін – моделює теплообмін в тепловій мережі шляхом конвекції, спричиненою рухом рідини. Швидкість теплообміну пропорційна різниці температур, коефіцієнту теплообміну та площі поверхні, яка знаходиться в контакті з рідиною[63](4.1):

$$\dot{Q} = \alpha F \Delta T \quad (4.1)$$

\dot{Q} - теплова потужність, що передається через конвекцію (Вт),

α - коефіцієнт теплопередачі (Вт/(м²·К)),

F - площа теплообміну (м²),

ΔT – різниця температур між теплоносієм і поверхнею (К).

Цей блок використовується в Simulink для моделювання теплових процесів у системах опалення, охолодження та теплообміну.

Провідний теплообмін – цей блок моделює теплообмін в тепловій мережі провідністю через шар матеріалу. Швидкість теплообміну регулюється законом Фур'є і пропорційна різниці температур, теплопровідності матеріалу, площі, нормальної до напрямку теплопередачі, і обернено пропорційна товщині шару[64](4.2):

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} F \Delta T \quad (4.2)$$

\dot{Q} - потік теплоти (Вт),

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу (Вт/(м·К)),

δ – товщина шару матеріалу (м),

F – площа теплообміну (м²),

ΔT – різниця температур між двома поверхнями матеріалу (К).

Цей блок використовується для моделювання передачі тепла через стіни, теплоізоляцію, теплопровідні елементи у системах опалення, охолодження та ТНУ.

Теплова маса – цей блок моделює внутрішнє накопичення енергії в моделі теплової мережі. Швидкість збільшення температури пропорційна швидкості теплового потоку в матеріал і обернено пропорційна масі і теплоємності матеріалу[65](4.3):

$$\dot{Q} = C_p m \Delta T \quad (4.3)$$

\dot{Q} - кількість переданої теплоти (Вт),

C_p - питома теплоємність матеріалу (Дж/(кг·К)),

m – маса матеріалу (кг),

ΔT – зміна температури матеріалу (К).

Цей блок застосовується в моделях теплообміну, наприклад, у системах опалення, охолодження та ТНУ, щоб правильно враховувати теплоакумуючі властивості матеріалів, таких як бетонні стіни, вода в системах опалення або ґрунт у геотермальних системах.

Контрольоване джерело температури (рис. 4.2) - цей блок дозволяє контролювати температуру незалежно від теплового потоку. Він використовується для задання температури в системі теплопередачі та має три порти: основний тепловий порт А, другий тепловий порт В та сигнальний порт S, через який передається керуючий сигнал. Температура між портами А та В визначається значенням сигналу на вході S: якщо S більше нуля, температура в порту В буде вищою, ніж у порту А, а якщо S менше нуля, температура в порту В буде нижчою. Цей блок застосовується для моделювання джерел теплової енергії, таких як котли, радіатори, ТНУ, а також для реалізації систем управління температурою в опалювальних та охолоджувальних системах. Він дозволяє моделювати термостатичні регулятори та автоматизовані системи теплозабезпечення, що особливо корисно при розробці та дослідженні динамічних систем регулювання клімату в будівлях або ТНУ [46].

Controlled temperature source



Рисунок 4.2. Елемент контрольованого джерела температури

Контрольоване джерело теплового потоку (рис. 4.3) - дозволяє підтримувати контрольовану величину теплового потоку в моделі теплової мережі. Він працює незалежно від температури та забезпечує заданий потік теплоти між двома тепловими портами А і В відповідно до вхідного керуючого сигналу, поданого через порт S. Якщо сигнал

позитивний, тепло передається від порту А до порту В, а якщо негативний – у зворотному напрямку. Цей блок використовується для моделювання різних джерел енергії в системах тепlopостачання, таких як нагрівальні елементи, ТНУ або системи охолодження, а також для розробки і тестування алгоритмів керування теплонасосними установками та іншими системами енергозабезпечення.

Controlled heat flow rate source



Рисунок 4.3. Елемент контрольованого джерела температури

Вплив зовнішніх умов

Для точного моделювання теплових процесів враховувалися такі зовнішні фактори:

1. **Зовнішня температура:** Її коливання впливають на теплові втрати через огорожувальні конструкції.
2. **Сонячна радіація:** Розраховано теплонадходження залежно від інтенсивності випромінювання та орієнтації будівлі.

На рис. 4.4 зображена схема моделює теплові процеси в окремій кімнаті із використанням середовища Simulink / Simscape. У ній враховуються основні процеси теплообміну між компонентами кімнати та її зовнішнім середовищем.

У моделі передбачено температурний сенсор, який вимірює температуру в приміщенні, та обігрівач (Heater), що забезпечує тепловий потік для підтримання комфортної температури. Також включено повітряну

теплову масу (Air thermal mass), яка враховує теплоємність повітря у приміщенні та його здатність накопичувати тепло.

Процеси теплопередачі моделюються через конвекційний теплообмін (Air-IW convection, Air-floor convection, Air-roof convection), який описує передачу тепла між повітрям у кімнаті та поверхнями внутрішніх стін, підлоги та даху. Водночас, теплопередача через конструкції (Half IW-air conduction, Half floor-air conduction, Half roof-air conduction) враховує передачу теплоти між цими поверхнями та тепловими масами стін, підлоги та даху.

Теплові маси конструкцій (IW thermal mass, Roof thermal mass, Floor thermal mass) моделюють накопичення та віддачу теплоти внутрішніми стінами, дахом і підлогою, що забезпечує інерційність системи опалення. Крім того, модель враховує втрати через вікна (Window-atmosphere leakage), що симулюють теплові втрати через вентиляцію або нещільності.

Зовнішня температура моделюється через блок Temperature source atmosphere, який задає температуру зовнішнього середовища. Вона впливає на тепловтрати через конструкції та визначає взаємодію кімнати із зовнішнім середовищем.

Ця модель дозволяє детально досліджувати динамічні процеси теплообміну в кімнаті, оцінювати ефективність опалення та вплив утеплення, а також розробляти стратегії керування кліматом у будівлі.

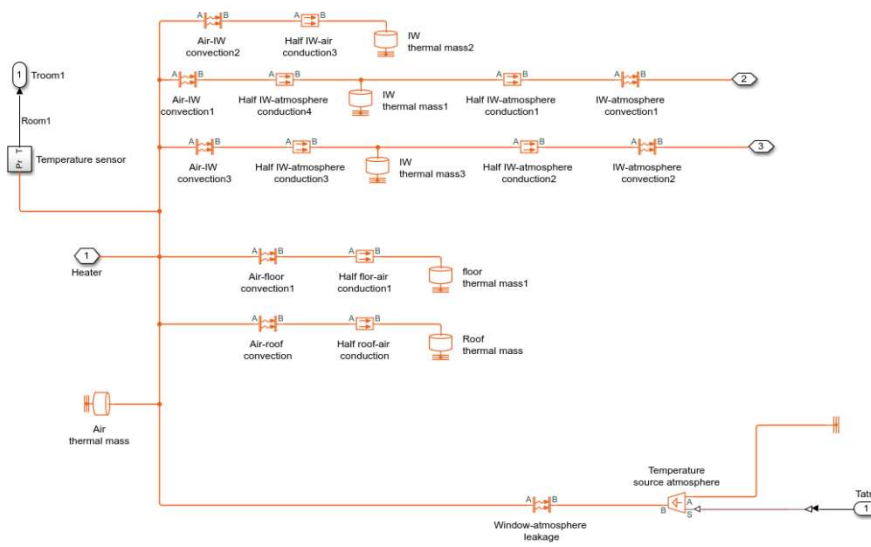


Рисунок 4.4. Модель кімнати

Схема на рисунку 4.5 моделює систему теплопостачання будинку із використанням радіаторного опалення та розподілом теплової енергії між кімнатами. Вона побудована у Simulink / Simscape та включає ключові елементи системи опалення та моніторингу температури.

Система містить чотири кімнати (Room 1, Room 2, Room 3, Room 4), кожна з яких отримує тепло через радіатор, підключений до загального контуру теплоносія. Гарячий теплоносій надходить через вхід In, проходить через радіатори, нагріваючи повітря в кімнатах, а потім виходить через вихід Out. Потoki теплоносія між радіаторами розподіляються за допомогою трубопроводів, які позначені кольоровими лініями (гарячий потік – червоний, охолоджений – жовтий).

Модель також включає датчики температури, які вимірюють температуру у кожній кімнаті та передають дані для обчислення середньої температури (Indoor average). Сигнали з датчиків передаються на блоки усереднення температури T_{avg} , які обчислюють середню температуру для всього будинку та окремих груп приміщень (наприклад, для дитячої кімнати та інших зон). Температура зовнішнього середовища моделюється через вхід T_{atm} , що дозволяє оцінити вплив навколишніх умов на систему опалення.

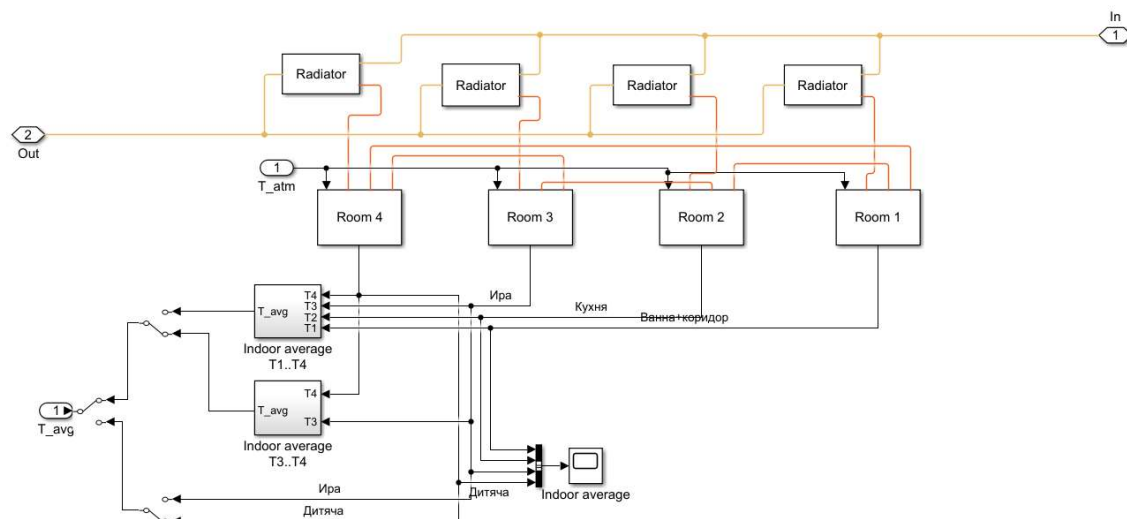


Рисунок 4.5. Модель системи опалення будинку

Ця модель дозволяє аналізувати ефективність опалення, розподіл тепла між кімнатами та контролювати середню температуру всередині будинку. Вона може бути використана для дослідження різних алгоритмів керування опалювальною системою, таких як переривчастий режим роботи ТНУ або регулювання температури за заданими графіками споживання тепла.

Результати моделювання

Розроблена модель будинку забезпечує:

1. **Аналіз теплових процесів:** Визначення змін температури у приміщеннях залежно від внутрішніх та зовнішніх умов.
2. **Оцінку енергоефективності:** Розрахунок теплових втрат через конструктивні елементи будівлі.
3. **Оптимізацію систем опалення:** Тестування різних алгоритмів керування для мінімізації енергоспоживання.
4. **Дослідження сценаріїв роботи:** Аналіз поведінки системи за різних кліматичних та експлуатаційних умов.

Переваги підходу

1. **Універсальність:** Модель адаптується до різних типів будівель із урахуванням специфіки конструктивних елементів.
2. **Точність:** Динамічний підхід до врахування теплових потоків забезпечує високу деталізацію результатів.
3. **Інтеграція:** Модель може бути інтегрована із системами автоматизованого керування ТНУ.

Розроблена динамічна модель будинку в MATLAB Simulink із використанням бібліотек Simscape є потужним інструментом для дослідження теплових процесів, оптимізації систем теплозабезпечення та розробки ефективних алгоритмів керування. Завдяки точності та гнучкості, модель є універсальним інструментом для вирішення широкого спектра наукових і практичних задач.

4.3 Інтеграція моделі ТНУ з моделлю будинку

Інтеграція моделі ТНУ з моделлю будинку є важливим етапом у дослідженні комплексних систем теплозабезпечення. Цей процес дозволяє об'єднати окремі модулі у єдину динамічну модель, яка враховує взаємодію між системою опалення і тепловими процесами у будівлі. Таке поєднання створює основу для проведення аналізу енергоефективності, оптимізації роботи ТНУ та оцінки комфорту у приміщеннях. Результати моделювання сприяють розробці інноваційних підходів до керування енергоспоживанням і підвищення якості опалювальних систем.

Структура інтегрованої моделі

Інтегрована модель включає два основні компоненти (рис. 4.6):

1. **Модель ТНУ:** описує динамічні процеси у компресорі, теплообміннику, випарнику та дросельному вентилі. Враховуються зовнішня температура, теплове навантаження і робочий стан системи.
2. **Модель будинку:** моделює теплові процеси всередині приміщень, включаючи тепловтрати, теплонадходження через огорожувальні конструкції та взаємодію між кімнатами.

Зв'язок між компонентами забезпечується за допомогою:

- **Температури теплоносія та витрата теплоносія:** вихідна температура води з конденсатора ТНУ та масова витрата теплоносія виступають вхідними параметрами для системи опалення будинку.
- **Теплового навантаження:** модель будинку генерує сигнал, який вказує ТНУ на необхідну теплову потужність для підтримання комфортних умов, що визначається як функція температури зворотньої води в системі опалення.
- **Сигналів керування:** регулюють режим роботи компресора, залежно від поточного теплового балансу.

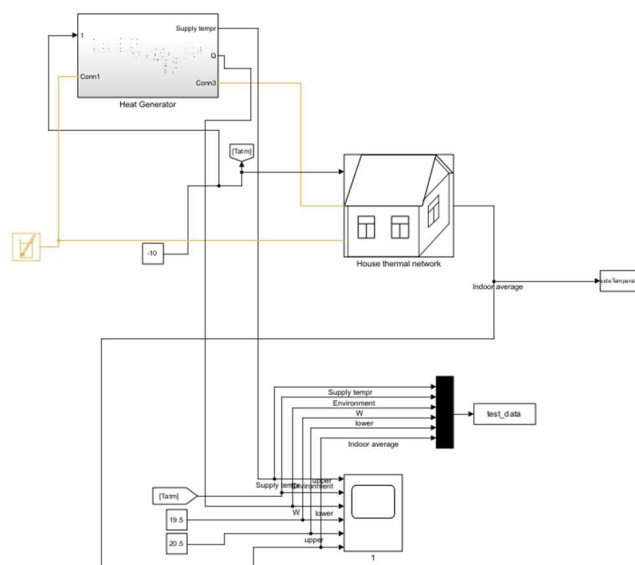


Рисунок 4.6. Схема інтегрованої моделі системи теплозабезпечення будинку на базі ТНУ

Взаємодія між компонентами

Взаємодія між моделлю ТНУ і будинком базується на передачі фізичних сигналів і модельних параметрів. Основними елементами цієї взаємодії є:

- Зовнішня температура повітря, що визначає ефективність роботи випарника.
- Температура води, що повертається, для оцінки поточного стану теплообмінника.
- Теплове навантаження, що визначає режим роботи компресора.

Алгоритм інтеграції

Процес інтеграції включає такі етапи:

1. Розробка інтерфейсів передачі даних:

- Використання S-функцій MATLAB Simulink для організації обміну сигналами між моделями.

- Перетворення фізичних сигналів у модельні параметри.

2. Налаштування моделі ТНУ:

- Урахування залежності теплової потужності від зовнішніх умов.
- Реалізація алгоритмів регулювання частоти компресора для підтримання стабільної температури теплоносія.

3. Налаштування моделі будинку:

- Розрахунок теплових втрат через огорожувальні конструкції з урахуванням характеристик матеріалів.
- Динамічний розрахунок теплового навантаження залежно від змін кліматичних умов.

4. Тестування інтеграції:

- Аналіз узгодженості роботи обох моделей.
- Перевірка точності результатів за різних сценаріїв.

Результати моделювання показали, що середнє відхилення температури в приміщеннях не перевищувало $0,5^{\circ}\text{C}$, що підтверджує точність і стабільність моделі.

Результати моделювання

Інтегрована модель дозволяє:

1. **Досліджувати динамічну поведінку системи:** аналізувати зміни теплового балансу в режимі реального часу.
2. **Оптимізувати алгоритми керування:** тестувати різні підходи до регулювання роботи компресора і насоса.
3. **Оцінювати енергоефективність:** визначати вплив різних сценаріїв експлуатації на споживання енергії.

Переваги інтегрованого підходу

1. **Комплексність:** модель враховує всі ключові аспекти взаємодії між ТНУ і системою опалення.
2. **Точність:** висока деталізація дозволяє враховувати навіть незначні теплові впливи.
3. **Гнучкість:** можливість адаптації моделі до різних типів будівель і систем опалення.
4. **Масштабованість:** інтеграція додаткових енергосистем, таких як вентиляція або відновлювані джерела енергії.

Висновки

Інтеграція моделі ТНУ з моделлю будинку в MATLAB Simulink створює потужний інструмент для дослідження, аналізу та оптимізації систем теплозабезпечення. Отримані результати підтверджують можливість застосування цієї моделі для різноманітних дослідницьких і практичних завдань. Модель є універсальною платформою для розробки інноваційних підходів до керування системою теплозабезпечення будинку на базі ТНУ.

4.4 Дослідження динамічних режимів роботи системи

Дослідження динамічних режимів роботи системи теплозабезпечення є важливим етапом для оцінки ефективності керування ТНУ. Система повинна адаптивно реагувати на зміну зовнішніх умов, таких як температура навколишнього середовища, для підтримання стабільного теплового комфорту в приміщеннях. Одним із класичних підходів до регулювання є впровадження ПД-контролера, який дозволяє динамічно змінювати температуру прямої води, що подається з ТНУ в систему опалення.

Опис системи керування

ПІД-контролер впроваджено в систему для керування температурою прямої води на виході з ТНУ. Мета регулятора — мінімізувати відхилення температури в приміщеннях від заданих комфортних значень за рахунок адаптації до змін зовнішньої температури.

Основними компонентами системи є:

1. **ТНУ:** генерує теплову енергію для опалення будівлі.
2. **Система опалення будинку:** забезпечує передачу тепла до приміщень.
3. **ПІД-контролер:** регулює температуру прямої води ТНУ залежно від змін температури навколишнього середовища.

Алгоритм роботи ПІД-контролера

ПІД-контролер обчислює керуючий сигнал на основі відхилення між заданою температурою прямої води та фактичною температурою, а також враховує похідну і інтеграл цієї різниці.

Імплементація у MATLAB Simulink

У середовищі MATLAB Simulink реалізовано модель ПІД-контролера, інтегрованого в систему теплозабезпечення. Основні кроки:

1. **Вхідні дані:** Зовнішня температура та задана температура приміщення.
2. **Розрахунок відхилення:** Визначення різниці між бажаною та реальною температурою приміщень.
3. **Розрахунок керуючого сигналу:** Використання блоку PID Controller у Simulink для обчислення сигналу на основі формули ПІД-регуляції.

4. **Адаптація температури прямої води:** Передача сигналу до ТНУ для зміни температури води на виході.

Тестування системи

Для перевірки ефективності роботи системи проведено тестування в умовах змінної зовнішньої температури. Використано три сценарії:

1. **Стабільна температура:** Зовнішня температура залишається незмінною, модель оцінює точність підтримання заданої температури приміщень.
2. **Зміна температури:** Добові коливання зовнішньої температури з амплітудою 10°C , оцінюється адаптивність системи.
3. **Аварійна ситуація:** Різке зниження температури на 15°C , тестується здатність системи швидко відновлювати стабільність.

Результати тестування

Результати моделювання (рис. 4.7.) показали, що система підтримує температуру приміщень із середнім відхиленням не більше $0,5^{\circ}\text{C}$, а ПІД-контролер швидко реагує на зміни зовнішньої температури, забезпечуючи плавну адаптацію температури прямої води.

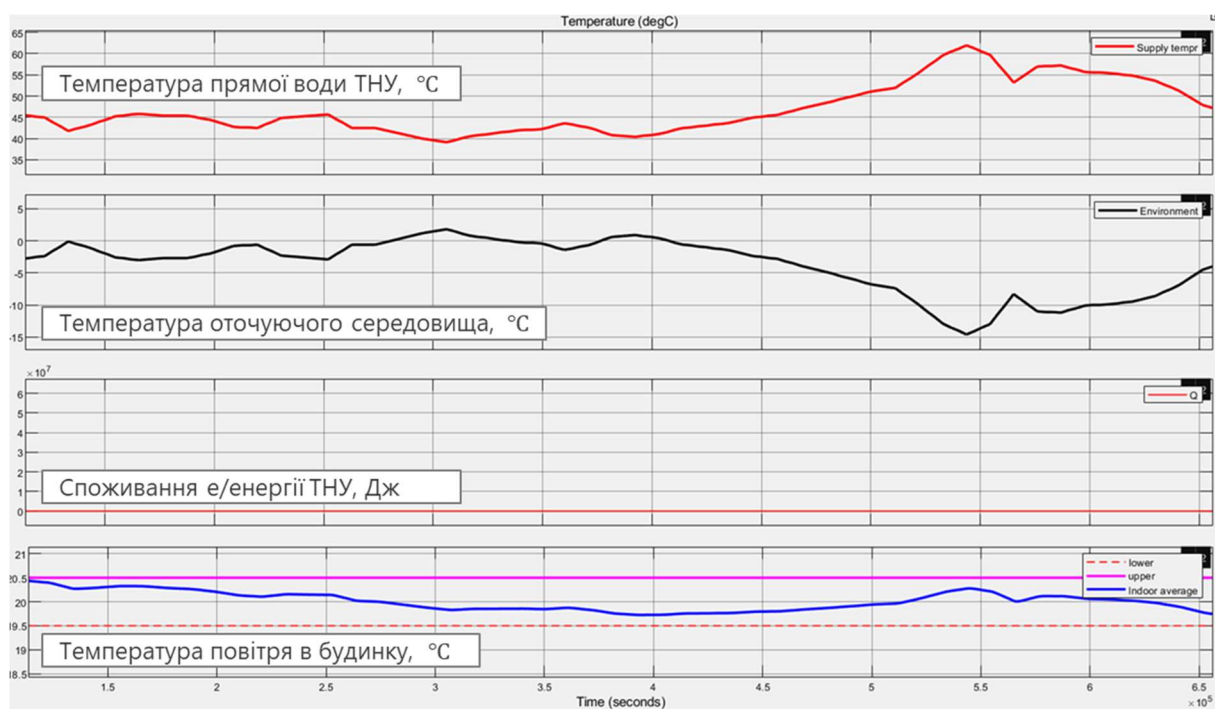


Рисунок 4.7. Місце для графіків температури приміщень і прямої води за різних сценаріїв.

Переваги використання ПІД-контролера

1. **Гнучкість:** Можливість адаптації до різних умов експлуатації.
2. **Ефективність:** Мінімізація енергоспоживання за рахунок точного регулювання температури.
3. **Стабільність:** Забезпечення комфортних умов навіть за змінних кліматичних умов.

Висновки

Впровадження ПІД-контролера в систему теплозабезпечення дало можливість значно підвищити ефективність керування та забезпечити стабільний тепловий комфорт у будинку. Модель підтвердила свою здатність адаптуватися до зовнішніх умов і підтримувати задані температурні параметри з високою точністю. Отримані результати можуть

бути використані для подальшої оптимізації роботи ТНУ та систем опалення.

4.5 Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто дослідження динамічних режимів роботи системи теплозабезпечення будинку з інтеграцією ТНУ та впровадженням ПІД-контролера для регулювання температури прямої води. Основними досягненнями дослідження є:

1. **Моделювання адаптивної системи керування:** Створено модель системи, яка забезпечує стабільність теплового комфорту в приміщеннях завдяки динамічному регулюванню температури прямої води з урахуванням змін температури зовнішнього середовища.
2. **Ефективність використання ПІД-контролера:** Продемонстровано здатність ПІД-контролера підтримувати стабільний температурний режим із мінімальними відхиленнями від заданих параметрів навіть за умов швидких змін зовнішніх факторів.
3. **Тестування в динамічних умовах:** Проведено серію тестів із моделювання різних сценаріїв роботи системи, що підтвердили її ефективність, стійкість та енергоефективність.

Виявлені переваги

Дослідження динамічних режимів роботи підтвердило низку переваг впровадження ПІД-контролера в систему теплозабезпечення:

1. **Висока точність регулювання:** Система забезпечує стабільний температурний режим із середнім відхиленням не більше $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

2. **Гнучкість:** Модель адаптується до змін зовнішніх умов, враховуючи сезонні коливання температури та добові зміни.
3. **Енергоефективність:** Економія енергоресурсів досягнута за рахунок точного керування температурними параметрами.

Рекомендації для подальших досліджень

1. **Інтеграція прогнозних алгоритмів:** Використання методів машинного навчання для прогнозування теплового навантаження дозволить підвищити ефективність роботи системи.
2. **Оптимізація параметрів ПД-контролера:** Застосування адаптивних алгоритмів налаштування коефіцієнтів, дозволить поліпшити роботу в умовах непередбачуваних змін.
3. **Дослідження альтернативних алгоритмів керування:** Порівняння ПД-контролера з іншими підходами, такими як модельно-прогнозуюче керування (МРС), може виявити нові шляхи підвищення продуктивності системи.
4. **Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії:** Модель може бути адаптована для синхронізації роботи з сонячними колекторами або іншими джерелами відновлюваної енергії.

Загальний висновок

Розробка і впровадження системи керування ТНУ із застосуванням ПД-контролера дозволили досягти високого рівня стабільності, енергоефективності та адаптивності системи теплозабезпечення будинку. Отримані результати підтвердили доцільність використання цього підходу для створення сучасних енергоефективних систем опалення. Подальші дослідження в цьому напрямку можуть сприяти розширенню можливостей таких систем і їх інтеграції в комплексні енергетичні рішення.

Розділ 5. Розробка та дослідження алгоритмів керування переривчастим обігрівом на базі ТНУ

Сучасний розвиток енергоефективних технологій та прагнення до зменшення споживання енергоресурсів значно підвищили популярність систем теплозабезпечення на базі ТНУ. Основним викликом у впровадженні таких систем є досягнення балансу між енергетичною ефективністю та забезпеченням стабільного теплового комфорту для користувачів. Особливе значення набуває оптимізація роботи системи в нічний період, коли зниження активного використання приміщень дозволяє скоротити витрати енергії за умови збереження прийнятного рівня комфорту[66].

У зв'язку з цим, актуальність дослідження адаптивних алгоритмів керування температурними параметрами ТНУ зростає. Урахування впливу зовнішніх умов, добового теплового навантаження та потреб користувачів створює підґрунтя для розробки ефективних підходів до управління. Така оптимізація не лише сприяє зниженню енергоспоживання, але й підвищує економічну привабливість використання ТНУ для побутових і промислових потреб.

Одним із ключових аспектів підвищення ефективності систем теплозабезпечення є впровадження алгоритмів адаптивного переривчастого керування. Традиційні підходи, що передбачають безперервне підтримання заданої температури у приміщенні, часто призводять до перевитрат енергії, особливо в нічний час. У цьому контексті переривчасте керування, яке базується на зміні температури теплоносія відповідно до встановлених режимів, дозволяє суттєво зменшити споживання енергії.

Мета та задачі розділу

Метою даного розділу є аналіз впливу нічної уставки температурного режиму на енергоспоживання системи ТНУ та розробка рекомендацій щодо

оптимізації її роботи. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні задачі:

1. Визначення оптимальних параметрів нічної уставки, які забезпечують мінімізацію енергоспоживання при збереженні комфортних умов.
2. Дослідження впливу часу початку розігріву системи на досягнення необхідної температури перед активною фазою доби.
3. Аналіз залежностей між температурними параметрами системи та якістю теплозабезпечення.
4. Розробка та впровадження вдосконалених методів переривчастого керування у реальних умовах експлуатації.

Дослідження базується на використанні моделювання у середовищі MATLAB/Simulink із залученням інтегрованих аналітичних і нейронних моделей. Такий підхід забезпечує високу точність розрахунків та можливість врахування нелінійних залежностей у роботі системи.

Основні передумови дослідження

Переривчасте керування системами теплозабезпечення враховує декілька ключових принципів:

1. **Оптимізація температурного режиму:** вибір нічної уставки, що мінімізує споживання енергії без значного зниження комфорту.
2. **Часові налаштування розігріву:** розрахунок оптимального часу включення системи для досягнення бажаної температури.
3. **Моделювання нелінійностей:** врахування впливу зовнішніх умов та динамічних змін теплового навантаження.

4. Інтеграція сучасних моделей: застосування аналітичних та нейронних моделей для підвищення точності прогнозів і ефективності алгоритмів керування.

5.1 Методологія дослідження

5.1.1 Підхід до проведення досліджень

Для досягнення мети дослідження було обрано комплексний підхід, який поєднує чисельне моделювання, аналітичний аналіз та порівняння результатів моделювання з теоретичними оцінками. Основним інструментом дослідження слугувало моделювання у середовищі MATLAB/Simulink, що дозволяє відтворити динаміку роботи системи теплозабезпечення на базі ТНУ в різних умовах експлуатації (рис. 5.1).

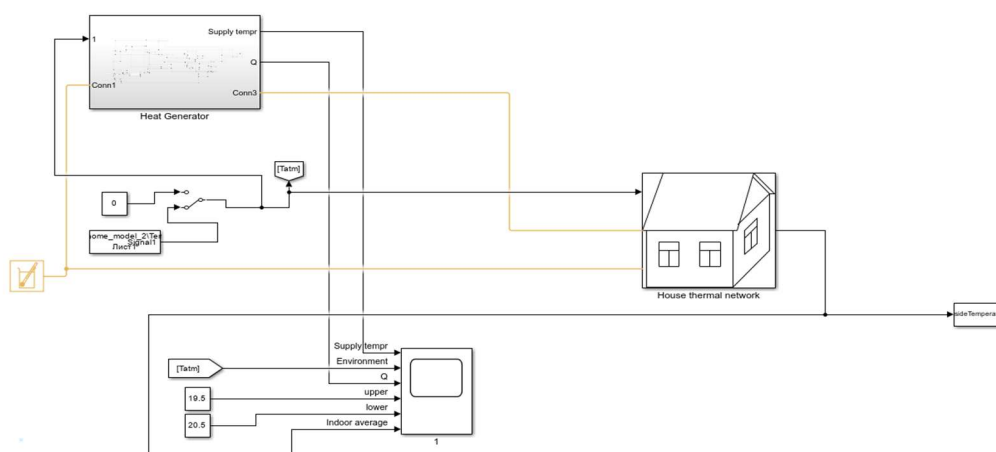


Рисунок 5.1. Блок-схема моделювання системи теплозабезпечення будинку на базі ТНУ

Система моделювання охоплює:

1. Модель будівлі з урахуванням її теплофізичних характеристик (опір теплопередачі, теплоємність, вплив сонячного випромінювання та зовнішньої температури).

2. Модель ТНУ, яка базується на аналітичних залежностях або нейронних мережах для прогнозування її поведінки.
3. Алгоритм керування температурою теплоносія, що включає переривчастий режим роботи для оптимізації споживання енергії.

Для дослідження використовувалися різні сценарії експлуатації системи з метою оцінювання впливу нічних уставок, часових налаштувань розігріву та зовнішніх умов на ефективність роботи системи.

5.1.2 Алгоритм дослідження

Дослідження проводилося за наступним алгоритмом:

1. Формування вхідних даних:

- температурні режими зовнішнього середовища (-10°C , -5°C , 0°C , $+3^{\circ}\text{C}$);
- характеристики будівлі та ТНУ;
- змінні параметри нічної уставки та часу розігріву.

2. Моделювання роботи системи:

- чисельне моделювання динаміки температур у приміщеннях;
- розрахунок енергоспоживання для кожного сценарію.

3. Аналіз результатів:

- оцінка залежностей між параметрами системи та споживанням енергії;
- порівняння ефективності переривчастого та безперервного режимів роботи.

4. Порівняння результатів моделювання з теоретичними оцінками:

- порівняння результатів чисельного моделювання з теоретичними оцінками. Особлива увага приділялася точності відтворення динаміки температур у приміщеннях та оцінці енергоспоживання ТНУ у різних режимах роботи.

5.1.3 Висновки до методології

Запропонована методологія дозволяє оцінити ефективність системи теплозабезпечення з переривчастим керуванням. Поєднання чисельного моделювання, експериментальної верифікації та аналітичного аналізу забезпечує високу точність і надійність отриманих результатів, що є основою для подальшого вдосконалення алгоритмів керування.

5.2 Експериментальне дослідження впливу температурних режимів на енергоспоживання системи

Для визначення оптимальних параметрів переривчастого керування ТНУ було проведено серію експериментальних досліджень при різних температурах зовнішнього середовища. Основною метою експериментів було встановлення залежностей між температурними уставками, часом початку розігріву та енергоспоживанням системи.

5.2.1 Результати досліджень при температурі -10°C

При температурі зовнішнього повітря -10°C були досліджені різні комбінації часу включення розігріву та температури нічної уставки. Результати експериментів представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Результати досліджень при -10°C

Час включення розігріву, година доби	Температура нічної уставки, $^{\circ}\text{C}$	Спожита енергія, Дж	Відхилення від енергетичного оптимуму
4	36,5	2,897E+07	7,3%
5	40	2,761E+07	2,3%
6	43,5	2,699E+07	0,0%
7	48,5	2,862E+07	6,0%

Аналіз отриманих результатів показав, що оптимальним режимом є:

- температура нічної уставки: 43.5°C
- час включення розігріву: 6:00
- спожита енергія: $2.699\text{E}+07$ Дж

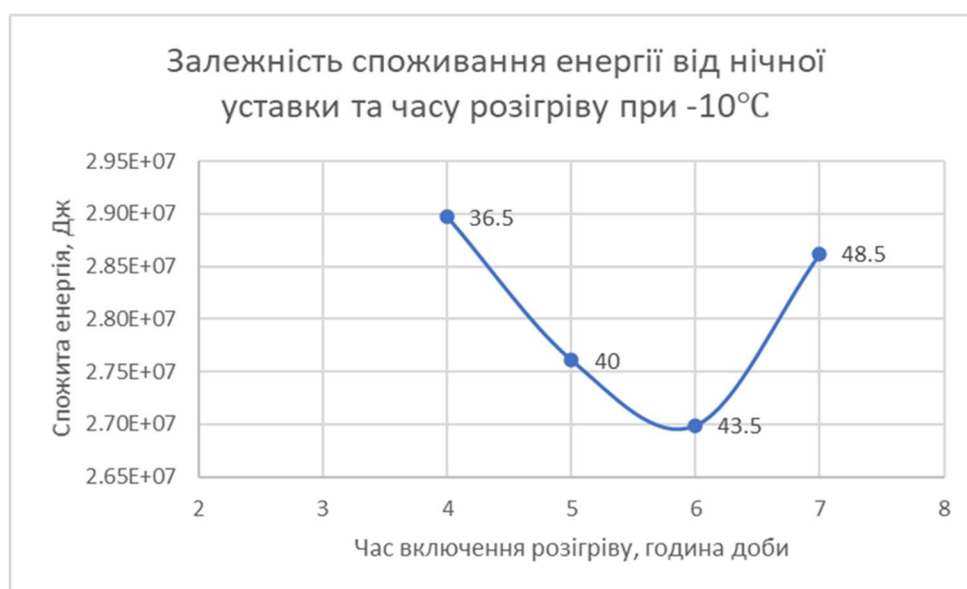


Рисунок 5.2. Графік залежності енергоспоживання від часу включення розігріву при -10°C

5.2.2 Результати досліджень при температурі -5°C

Експерименти при температурі -5°C показали суттєву зміну оптимальних параметрів керування. Результати представлені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Результати досліджень при -5°C

Час включення розігріву, година доби	Температура нічної уставки, $^{\circ}\text{C}$	Спожита енергія, Дж	Відхилення від енергетичного оптимуму
4	20	$2,50\text{E}+07$	80,9%
5	20	$2,11\text{E}+07$	52,8%
6	20	$1,67\text{E}+07$	21,2%
7	29	$1,38\text{E}+07$	0,0%
7,5	35,5	$1,453\text{E}+07$	5,3%

Оптимальний режим при даній температурі:

- температура нічної уставки: 29°C
- час включення розігріву: 7:00
- спожита енергія: $1.38\text{E}+07$ Дж

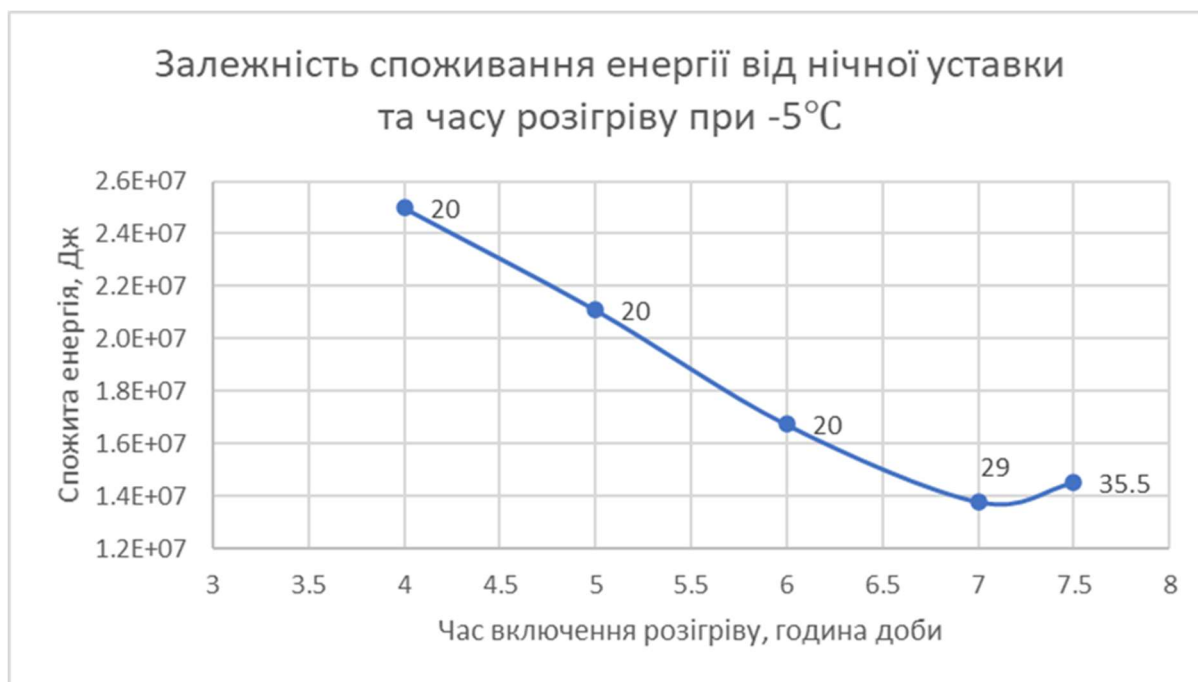


Рисунок 5.3. Графік залежності енергоспоживання від часу включення розігріву при -5°C

5.2.3 Результати досліджень при температурі 0°C

При дослідженні роботи системи за температури зовнішнього повітря 0°C спостерігалася суттєва зміна характеру енергоспоживання та оптимальних параметрів керування. Результати експериментів наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Результати досліджень при 0°C

Час включення розігріву, година доби	Температура нічної уставки, °C	Спожита енергія, Дж	Відхилення від енергетичного оптимуму
6	20	1,044E+07	46,9%
7	20	8,392E+06	18,1%
7,5	20,5	7,108E+06	0,0%
8	30,8	7,608E+06	7,0%

Аналіз експериментальних даних показав, що при температурі 0°C оптимальним режимом є:

- температура нічної уставки: 20.5°C
- час включення розігріву: 7:30
- спожита енергія: 7.108E+06 Дж

Важливо відзначити, що при даній температурі спостерігається значне зменшення необхідного часу випередження розігріву порівняно з від'ємними температурами. Це пояснюється меншими тепловтратами

будівлі та, відповідно, меншим часом, необхідним для досягнення комфортної температури.

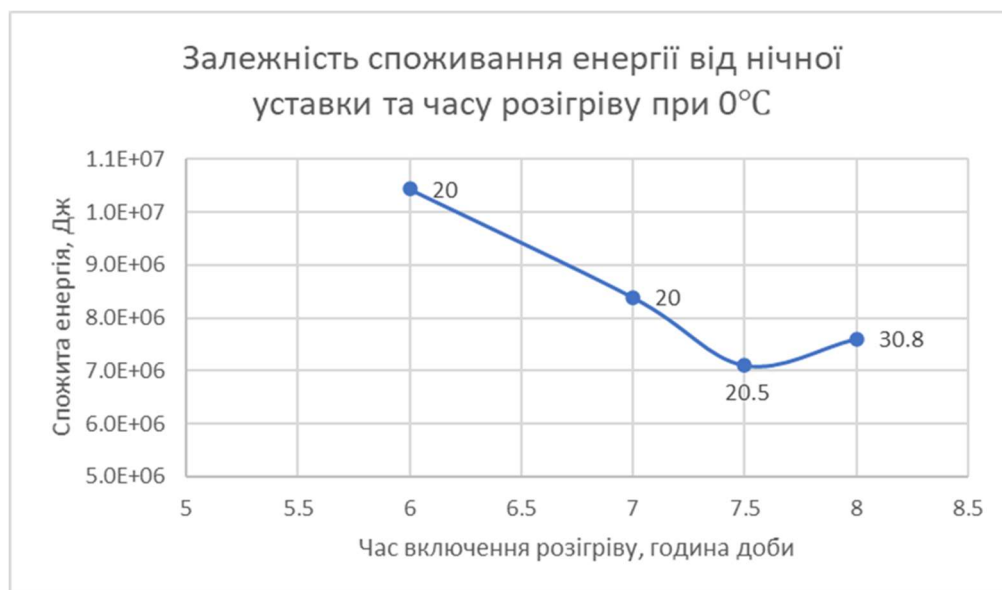


Рисунок 5.4. Динаміка температури та енергоспоживання при 0°C

Експериментально встановлено, що відхилення від оптимального часу включення розігріву призводить до збільшення енергоспоживання:

- при більш ранньому включенні (6:00) - на 46.9%
- при більш пізньому включенні (8:00) - на 7.0%

5.2.4 Результати досліджень при температурі +3°C

Дослідження роботи системи при температурі +3°C представляє особливий інтерес, оскільки це значення близьке до граничної температури опалювального сезону. Результати експериментів наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 - Результати досліджень при +3°C

Час включення розігріву, година доби	Температура нічної уставки, °C	Спожита енергія, Дж	Відхилення від енергетичного оптимуму
7	20	6,11E+06	59,0%
7,5	20	5,14E+06	33,8%
8	23,7	3,84E+06	0,0%
8,1667	30,5	5,86E+06	52,4%

Оптимальні параметри режиму роботи при +3°C:

- температура нічної уставки: 23.7°C
- час включення розігріву: 8:00
- спожита енергія: 3.84E+06 Дж

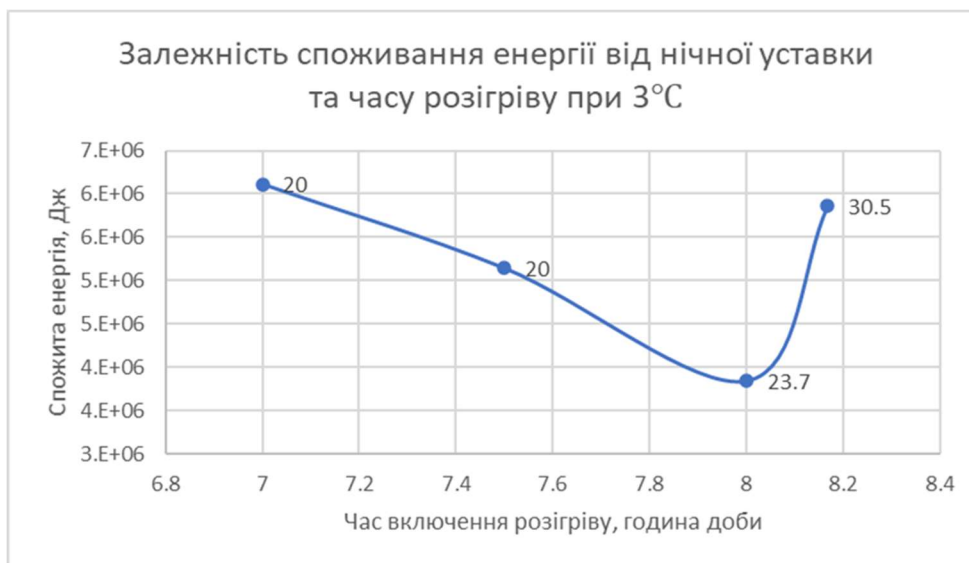


Рисунок 5.5. Порівняння енергоспоживання при різних режимах роботи при +3°C

При даній температурі зовнішнього середовища виявлено наступні особливості:

1. Суттєве зменшення загального енергоспоживання системи порівняно з нижчими температурами.
2. Збільшення чутливості системи до відхилень від оптимального режиму:
 - раннє включення розігріву (7:00) призводить до перевитрати енергії на 59.0%
 - незначне запізнення (8:10) призводить до збільшення енергоспоживання на 52.4%
3. Зміна характеру залежності температури нічної уставки:
 - при температурах нижче 0°C спостерігалось поступове зниження оптимальної уставки
 - при +3°C оптимальна уставка дещо підвищується (23.7°C порівняно з 20.5°C при 0°C)

5.2.5 Узагальнення результатів експериментальних досліджень

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити наступні закономірності:

1. Оптимальна температура нічної уставки знижується зі зростанням температури зовнішнього середовища.
2. Необхідний час випередження розігріву зменшується при підвищенні зовнішньої температури за нелінійним законом.
3. Енергетична ефективність переривчастого режиму зростає при наближенні температури зовнішнього середовища до розрахункової температури системи опалення.

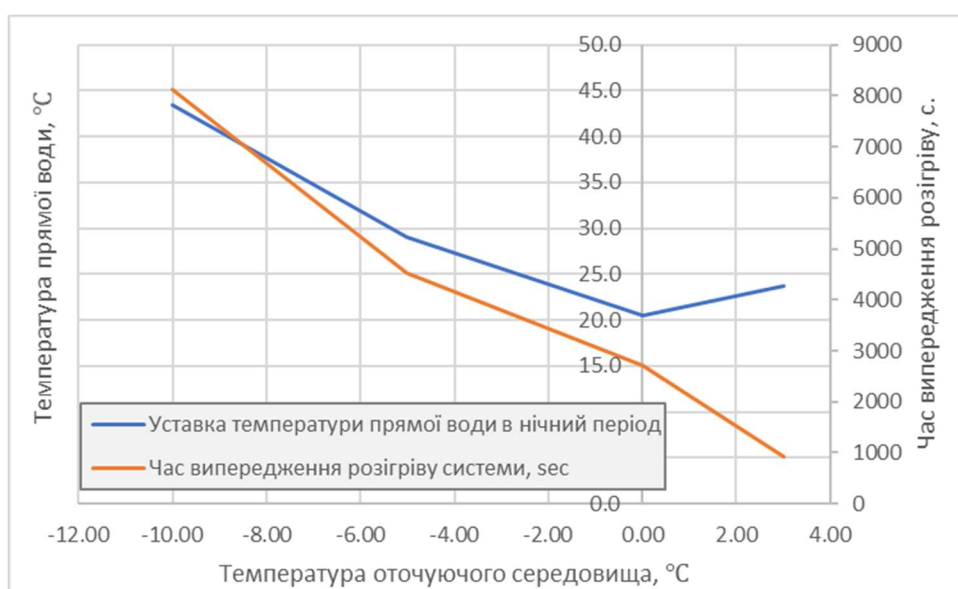


Рисунок 5.6. Узагальнені залежності оптимальних параметрів від температури

Отримані експериментальні дані були використані для формування моделей для налаштування параметрів адаптивної системи керування, що описано в наступних підрозділах.

На основі проведених досліджень були визначені оптимальні параметри переривчастого режиму роботи для різних температурних умов,

що дозволило забезпечити максимальну енергетичну ефективність системи теплозабезпечення при збереженні необхідного рівня теплового комфорту.

5.3 Розробка та реалізація алгоритму переривчастого керування

Розробка та впровадження ефективних алгоритмів керування ТНУ становить основу підвищення енергоефективності систем теплозабезпечення будівель. Спираючись на результати експериментальних досліджень, було розроблено та реалізовано алгоритм переривчастого керування, який враховує динамічні зміни зовнішньої температури й підтримує оптимальний баланс між енерговитратами та тепловим комфортом користувачів.

5.3.1 Структура алгоритму керування

Розроблений алгоритм базується на адаптивних принципах і передбачає чотири ключові функціональні блоки:

1. Блок збору та обробки первинної інформації

- Вимірювання температури зовнішнього повітря.
- Моніторинг температури теплоносія.
- Контроль температури в приміщенні.
- Облік енергоспоживання.

2. Блок розрахунку оптимальних параметрів

- Визначення температури нічної уставки.
- Розрахунок часу випередження розігріву.
- Формування температурної уставки.

3. Блок керування режимами роботи ТНУ

- Перемикання між основними режимами.
- Регулювання потужності ТНУ.

4. Блок моніторингу та оптимізації

- Аналіз поточної ефективності.
- Корекція параметрів на основі зворотного зв'язку.
- Формування звітності для подальшого вдосконалення.

5.3.2 Визначення оптимальних параметрів режиму

На основі експериментальних досліджень отримано набір оптимальних робочих параметрів у різних температурних діапазонах зовнішнього середовища (табл. 5.5).

Таблиця 5.5. Оптимальні параметри режимів роботи

Температура оточуючого середовища	Уставка температури прямої води в нічний період	Уставка температури прямої води в період розігріву системи	Час випередження розігріву системи, sec
-10	43,5	65	8120,162
-5	29	65	4520,162
0	20,5	65	2720,162
3	23,7	65	920,162

Основні закономірності:

1. Із підвищенням зовнішньої температури нічна уставка суттєво знижується: від 43.5 °C за -10 °C до 23.7 °C за +3 °C, що дає змогу раціональніше витрачати енергію.

2. Температура розігріву залишається сталою (65 °C) для всього діапазону, гарантуючи достатнє нагрівання приміщень до початку робочого дня.
3. Час випередження розігріву зменшується за вищих зовнішніх температур: від 8120 с за -10 °C до 920 с за +3 °C.

Для автоматизації розрахунку параметрів були розроблені поліноміальні моделі третього ступеня[67]. Формула 5.1 використовується для розрахунку температури нічної уставки.

$$T_{\text{night_est}} = a_3 T^3 + a_2 T^2 + a_1 T + a_0 =$$

$$= 0.017372 \times T^3 + 0.38058 \times T^2 - 0.23141 \times T + 20.5, \quad (5.1)$$

де $T_{\text{night_est}}$ — розрахункова температура нічної уставки; T — температура зовнішнього повітря; a_3, a_2, a_1, a_0 — коефіцієнти поліному.

Формула 5.2 використовується для розрахунку часу випередження.

$$t_{\text{heat_est}} = b_3 T^3 + b_2 T^2 + b_1 T + b_0 =$$

$$= -5.0769 \times T^3 - 40.1538 \times T^2 - 433.8462 \times T + 2720.162 \quad (5.2)$$

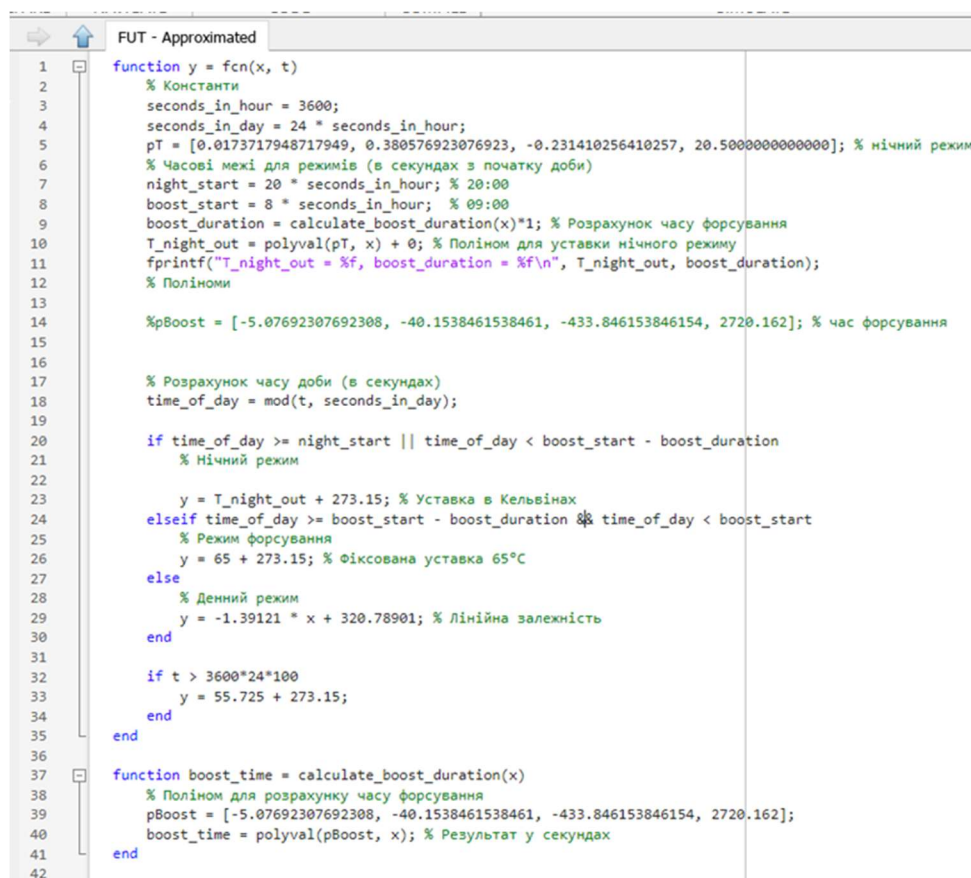
де $t_{\text{heat_est}}$ — розрахунковий час випередження розігріву; b_3, b_2, b_1, b_0 — відповідні коефіцієнти.

Значення RMSE близьке нулю у процесі верифікації підтверджує високу точність отриманих залежностей і можливість їх використання в режимі реального часу.

5.3.3 Реалізація алгоритму керування

Розроблений алгоритм реалізовано у середовищі MATLAB/Simulink, що передбачає три основні режими роботи (рис. 5.7):

1. Нічний режим (20:00 – час розігріву)
2. Режим розігріву (час розігріву – 8:00)
3. Денний режим (8:00 – 20:00)



```

1 function y = fcn(x, t)
2     % Константи
3     seconds_in_hour = 3600;
4     seconds_in_day = 24 * seconds_in_hour;
5     pT = [0.0173717948717949, 0.380576923076923, -0.231410256410257, 20.5000000000000]; % нічний режим
6     % Часові межі для режимів (в секундах з початку доби)
7     night_start = 20 * seconds_in_hour; % 20:00
8     boost_start = 8 * seconds_in_hour; % 08:00
9     boost_duration = calculate_boost_duration(x)*1; % Розрахунок часу форсування
10    T_night_out = polyval(pT, x) + 0; % Поліном для уставки нічного режиму
11    fprintf('T_night_out = %f, boost_duration = %f\n', T_night_out, boost_duration);
12    % Поліноми
13
14    %pBoost = [-5.07692307692308, -40.1538461538461, -433.846153846154, 2720.162]; % час форсування
15
16
17    % Розрахунок часу доби (в секундах)
18    time_of_day = mod(t, seconds_in_day);
19
20    if time_of_day >= night_start || time_of_day < boost_start - boost_duration
21        % Нічний режим
22
23        y = T_night_out + 273.15; % Уставка в Кельвінах
24    elseif time_of_day >= boost_start - boost_duration && time_of_day < boost_start
25        % Режим форсування
26        y = 65 + 273.15; % Фіксована уставка 65°C
27    else
28        % Денний режим
29        y = -1.39121 * x + 320.78901; % Лінійна залежність
30    end
31
32    if t > 3600*24*100
33        y = 55.725 + 273.15;
34    end
35 end
36
37 function boost_time = calculate_boost_duration(x)
38     % Поліном для розрахунку часу форсування
39     pBoost = [-5.07692307692308, -40.1538461538461, -433.846153846154, 2720.162];
40     boost_time = polyval(pBoost, x); % Результат у секундах
41 end
42
  
```

Рисунок 5.7. Реалізація алгоритму в Simulink

На рисунку 5.8 представлені результати моделювання у вигляді графіків:

- Верхній графік показує температуру прямої води ТНУ, де видно періодичне зниження у нічний час і підвищення вранці для розігріву.

- Другий графік демонструє температуру оточуючого середовища
- Третій графік відображає споживання енергії ТНУ, що знижується завдяки переривчастому керуванню.
- Нижній графік температуру повітря в будинку підтримується у заданих межах

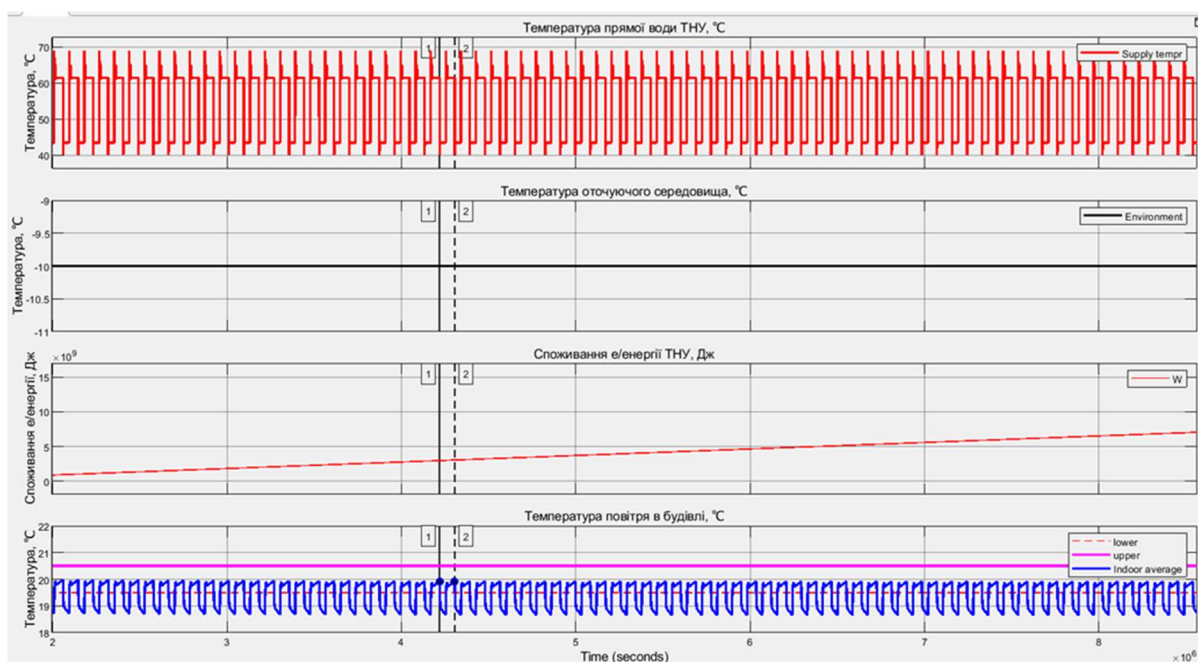


Рисунок 5.8. Реалізація алгоритму в Simulink

Основний висновок: завдяки реалізованим залежностям в алгоритмі керування вдалося стабільно підтримувати середню температуру повітря у приміщенні, водночас знижуючи енергоспоживання системи теплозабезпечення

5.3.4 Результати впровадження

Порівняльний аналіз роботи системи в безперервному та переривчастому режимі при зовнішній температурі $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ наведено нижче:

1. Безперервний режим (рис. 5.9)

- Середня температура повітря (20:00 – 8:00): $19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Температура на момент 8:00: $19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Середня температура прямої води: $55.7\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Споживання енергії: 3.99×10^9 Дж

Зміна середньої температури повітря та температури прямої води ТНУ в часі без переривчастого режиму

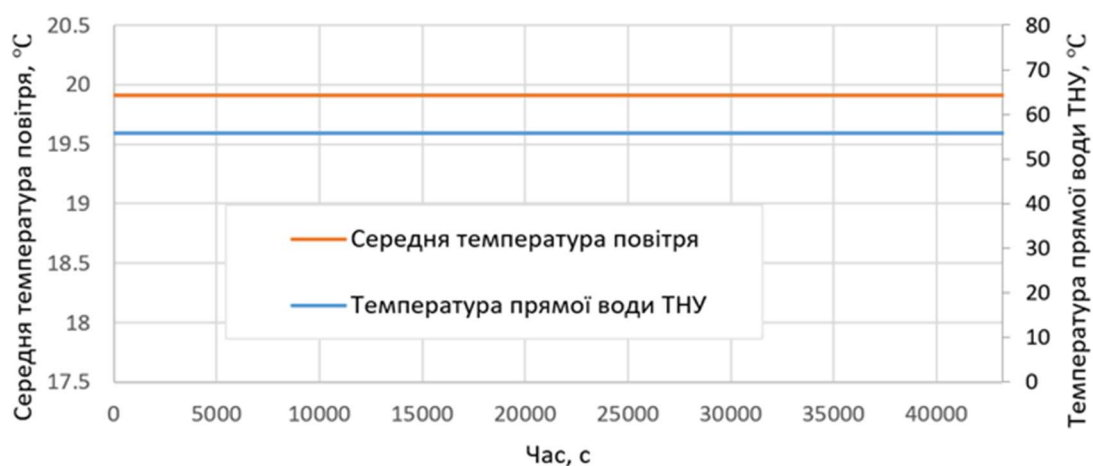


Рисунок 5.9. Графік роботи у безперервному режимі

2. Переривчастий режим (рис. 5.10)

- Середня температура повітря (20:00 – 8:00): $19.0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Температура на момент 8:00: $19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Середня температура прямої води: $47.9\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Споживання енергії: 3.27×10^9 Дж

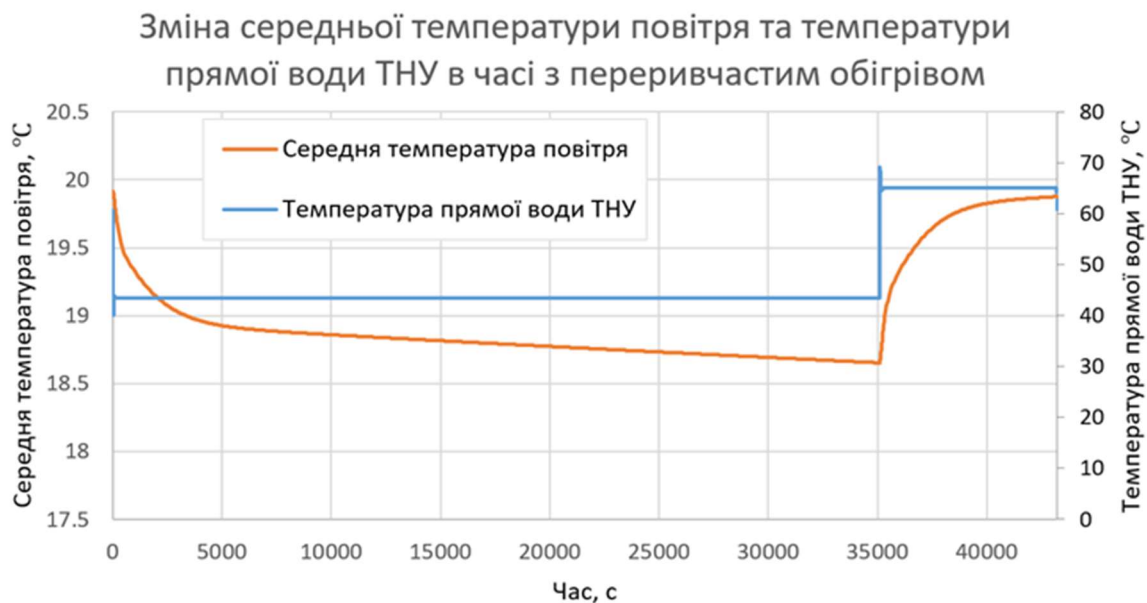


Рисунок 5.10. Графік роботи у переривчастому режимі

Порівняння отриманих результатів зображено в Таблиці X, що демонструє ключові показники порівняння:

При безперервному режимі середня температура повітря з 20:00 до 8:00 становила 19,9 °C, а загальна витрата енергії – $3,99 \times 10^9$ Дж.

З переривчастим режимом середня нічна температура трохи нижча (19 °C), натомість температура в момент 8:00 лишається фактично незмінною (19,9 °C), а середня температура теплоносія знижується до 47,9 °C. При цьому споживання енергії складає $3,27 \times 10^9$ Дж, що менше на 18%.

Таблиця 5.6. Порівняння отриманих результатів

	Середня температура 20:00 - 8:00, °C	Температура на момент 8:00, °C	Середня температура п. в. ТНУ, °C	Спожита е/енергія ТНУ, Дж
Без переривчастого режиму	19,9	19,9	55,7	3,99E+09
З переривчастим режимом	19	19,9	47,9	3,27E+09
Порівняння	4,5%	0,0%	14,0%	18,0%

Основні висновки:

- Енергоспоживання знижено на 18% завдяки адаптивному переривчастому керуванню.
- Комфортна температура (19.9 °C) досягнута до початку робочого дня без надмірних затрат енергії.
- Середня температура теплоносія зменшилася на 14%, що знижує навантаження на обладнання.
- У нічний період температура в приміщенні знизилася всього на 4.5%, що прийнятно для більшості типів будівель.

5.4 Висновки до розділу

У ході проведених досліджень було розроблено та протестовано алгоритм переривчастого керування ТНУ для забезпечення енергоефективного теплозабезпечення будівлі. Основні результати дослідження можна сформулювати наступним чином:

1. Оптимізація режиму роботи ТНУ

- Визначено, що використання переривчастого режиму дозволяє знизити споживання енергії на **18%** у порівнянні з безперервним режимом роботи, забезпечуючи при цьому комфортний температурний режим у приміщенні.
- Оптимальні параметри нічної уставки температури і часу розігріву встановлені для різних зовнішніх температурних умов, що дозволяє забезпечити раціональне використання енергоресурсів.

2. Динаміка теплових процесів та адаптивність керування

- Досліджено залежність між параметрами переривчастого керування (нічна уставка, час розігріву) та енергоспоживанням системи.
- Встановлено, що при зниженні температури зовнішнього середовища **час випередження розігріву збільшується**, що необхідно враховувати при реалізації алгоритмів керування.

3. Алгоритмічне забезпечення та реалізація в Simulink

- Розроблено алгоритм переривчастого керування на основі адаптивного підходу, який враховує зовнішні температурні умови та теплові навантаження.
- Реалізація алгоритму у середовищі MATLAB/Simulink дозволила перевірити його ефективність та підтвердити достовірність отриманих моделей.

4. Практична цінність та перспективи впровадження

- Запропонована методика може бути використана для реального впровадження в системи керування ТНУ, що дозволить зменшити енергоспоживання без втрати комфорту для користувачів.
- Подальші дослідження можуть бути спрямовані на **вдосконалення адаптивних алгоритмів**, використання методів машинного навчання для прогнозування теплових навантажень і динамічну оптимізацію температурних уставок.

Таким чином, результати цього розділу демонструють ефективність підходу до переривчастого керування ТНУ та його потенціал для підвищення енергоефективності систем теплозабезпечення будівель.

ВИСНОВКИ

У ході виконаного дослідження було розроблено та реалізовано математичні та нейромережеві моделі ТНУ у системі теплозабезпечення будівель. На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримано наступні основні висновки:

1. Аналіз сучасних методів управління та моделювання ТНУ

- ТНУ є перспективним рішенням для енергоефективного теплозабезпечення будівель, оскільки дозволяють зменшити залежність від традиційних джерел енергії та знизити витрати на опалення.
- Існуючі методи керування ТНУ здебільшого базуються на класичних підходах, таких як ПІД-регулювання, яке не враховує динамічні зміни зовнішніх умов, теплової інерційності та змінний графік використання будівель.
- Аналітичне моделювання дозволяє досліджувати процеси у ТНУ з високою точністю, проте потребує значних обчислювальних ресурсів, що робить його непридатним для задач реального часу.
- Використання методів машинного навчання, зокрема нейронних мереж, дає змогу зменшити обчислювальні витрати при збереженні точності прогнозування параметрів роботи ТНУ.

2. Розробка аналітичної моделі ТНУ

- Розроблена аналітична модель ТНУ, що базується на фундаментальних рівняннях теплопередачі, термодинаміки та енергетичного балансу.
- Модель враховує зміну параметрів теплоносія, робочого середовища та навколишнього середовища, що дозволяє відтворювати реальні режими роботи системи.

- Використання програмного пакета CoolProp у MATLAB дозволило підвищити точність обчислення термодинамічних параметрів робочого середовища.
- Валідація моделі показала високу точність у прогнозуванні коефіцієнта перетворення енергії (COP) та теплової потужності з похибкою (MAPE не більше 10,5%).

3. Розробка та інтеграція моделі машинного навчання ТНУ

- Запропоновано використання рекурентної нейронної мережі LSTM для моделювання нелінійної динаміки роботи ТНУ.
- Порівняльний аналіз показав, що LSTM перевищує за точністю прогнозування метод Random Forest, зменшуючи середню похибку (RMSE) з 48.15 Вт до 25.23 Вт.
- Для інтеграції в MATLAB Simulink було застосовано конвертацію моделі в С-код за допомогою keras2c та реалізацію через S-функцію, що дозволило зменшити середній час виконання одного прогнозу з 8.45×10^{-2} с до 5.2×10^{-5} с.
- Інтеграція нейромережевої моделі у Simulink дозволила значно пришвидшити моделювання системи теплозабезпечення без втрати точності.

4. Розробка моделі системи теплозабезпечення будинку

- Розроблено детальну модель будівлі, що враховує теплопровідність, теплову інерцію конструкцій, сонячну радіацію та вплив внутрішніх джерел тепла.
- Використання Simscape / Foundation Library / Thermal у MATLAB дозволило побудувати фізично коректну модель динаміки теплових процесів.

- Інтеграція моделі будинку з моделлю ТНУ забезпечила можливість аналізу різних алгоритмів керування теплозабезпеченням.

5. Оптимізація керування ТНУ з використанням адаптивних алгоритмів

- Запропоновано алгоритм переривчастого керування, що забезпечує оптимальну зміну температурної уставки у нічний час для зниження енергоспоживання та попереднє прогрівання приміщення перед початком робочого дня.
- Розроблено адаптивний ПД-регулятор, який динамічно керує температурою подачі теплоносія залежно від зовнішньої температури та теплового навантаження.
- Дослідження показали, що впровадження алгоритму переривчастого керування дозволяє зменшити витрати енергії до 18% без втрати комфорту.

6. Практичне значення та впровадження результатів

- Запропонована методика може бути використана для оптимізації роботи ТНУ у комерційних будівлях, що дозволяє мінімізувати енергоспоживання.
- Розроблена модель інтегрується у інтелектуальні системи керування будівлями, забезпечуючи автоматичне регулювання температурного режиму в залежності від графіка використання приміщень.
- Використання методів машинного навчання у моделюванні ТНУ дозволяє суттєво скоротити час розрахунків та впровадити їх у системи керування в режимі реального часу.
- Результати дослідження можуть бути використані для навчальних цілей у курсах з енергоефективних технологій та систем

автоматизації у Національному технічному університеті України "КПІ ім. Ігоря Сікорського".

Перспективи подальших досліджень

- Подальша оптимізація нейромережевої моделі для зниження обчислювальних витрат без втрати точності.
- Інтеграція методів прогнозуючого керування на основі машинного навчання для динамічного налаштування режимів роботи ТНУ.
- Розширення моделі для включення сонячних колекторів, акумуляторів тепла та інших джерел відновлюваної енергії.
- Впровадження розроблених алгоритмів у реальні системи управління для експериментального підтвердження їх ефективності.

Дисертаційне дослідження підтвердило ефективність розробленого підходу до оптимізації роботи ТНУ шляхом використання переривчастого керування та адаптивних алгоритмів. Інтеграція аналітичних моделей та нейронних мереж у MATLAB Simulink дозволила створити універсальний інструмент для дослідження та впровадження енергоефективних рішень у сучасних системах теплозабезпечення будівель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Z. Al-Atari, R. Shipman, i M. Gillott, «Optimisation of Integrated Heat Pump and Thermal Energy Storage Systems in Active Buildings for Community Heat Decarbonisation», *Energies (Basel)*, вип. 17, вип. 21, с. 5310, Жов 2024, doi: 10.3390/en17215310.
- [2] D. Meyer, R. Schoetter, i M. van Reeuwijk, «Energy and environmental impacts of air-to-air heat pumps in a mid-latitude city», *Nat Commun*, вип. 15, вип. 1, с. 5474, Чер 2024, doi: 10.1038/s41467-024-49836-3.
- [3] G. Murano, F. Caffari, i N. Calabrese, «Energy Potential of Existing Reversible Air-to-Air Heat Pumps for Residential Heating», *Sustainability*, вип. 16, вип. 14, с. 6047, Лип 2024, doi: 10.3390/su16146047.
- [4] M. Zafaranchi, W. T. Riddell, N. B. Chan, E. Saliba, i L. Leung, «Evaluating the Environmental Impact of Heat Pump Systems: An Integrated Approach to Sustainable Building Operations», *Energies (Basel)*, вип. 18, вип. 2, с. 388, Січ 2025, doi: 10.3390/en18020388.
- [5] W. Tang, Y. Li, S. Walker, i T. Keviczky, «Model Predictive Control Design for Unlocking the Energy Flexibility of Heat Pump and Thermal Energy Storage Systems», Лют 2024.
- [6] S. Akbarzadeh, Z. Sefidgar, M. Sadegh Valipour, B. Elmegaard, i A. Arabkoohsar, «A comprehensive review of research and applied studies on bifunctional heat pumps supplying heating and cooling», *Appl Therm Eng*, вип. 257, с. 124280, Груд 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124280.
- [7] P. Lamsal, S. B. Bajracharya, i H. B. Rijal, «A Review on Adaptive Thermal Comfort of Office Building for Energy-Saving Building Design», *Energies (Basel)*, вип. 16, вип. 3, с. 1524, Лют 2023, doi: 10.3390/en16031524.
- [8] E. M. Erebor, E. O. Ibem, I. C. Ezema, i A. B. Sholanke, «Energy Efficiency Design Strategies in Office Buildings: A Literature Review», *IOP Conf Ser*

- Earth Environ Sci*, вип. 665, вип. 1, с. 012025, Бер 2021, doi: 10.1088/1755-1315/665/1/012025.
- [9] H. B. Rijal, K. Yoshida, M. A. Humphreys, i J. F. Nicol, «Development of an adaptive thermal comfort model for energy-saving building design in Japan», *Archit Sci Rev*, вип. 64, вип. 1–2, с. 109–122, Бер 2021, doi: 10.1080/00038628.2020.1747045.
- [10] S. A. Abdel-Razek, H. S. Marie, A. Alshehri, i O. M. Elzeki, «Energy Efficiency through the Implementation of an AI Model to Predict Room Occupancy Based on Thermal Comfort Parameters», *Sustainability*, вип. 14, вип. 13, с. 7734, Чер 2022, doi: 10.3390/su14137734.
- [11] D. Borge-Diez, D. Icaza, D. F. Trujillo-Cueva, i E. Açikkalp, «Renewable energy driven heat pumps decarbonization potential in existing residential buildings: Roadmap and case study of Spain», *Energy*, вип. 247, с. 123481, Трав 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123481.
- [12] A. Heinz, F. Gritzer, i A. Thür, «The effect of using a desuperheater in an air-to-water heat pump system supplying a multi-family building», *Journal of Building Engineering*, вип. 49, с. 104002, Трав 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.104002.
- [13] F. Calise, F. Liberato Cappiello, L. Cimmino, M. Dentice d'Accadia, i M. Vicidomini, «Optimal design of a 5th generation district heating and cooling network based on seawater heat pumps», *Energy Convers Manag*, вип. 267, с. 115912, Бер 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115912.
- [14] G. Quirosa, M. Torres, V. M. Soltero, i R. Chacartegui, «Energetic and economic analysis of decoupled strategy for heating and cooling production with CO2 booster heat pumps for ultra-low temperature district network», *Journal of Building Engineering*, вип. 45, с. 103538, Січ 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103538.
- [15] L. M. P. Ghilardi, A. F. Castelli, L. Moretti, M. Morini, i E. Martelli, «Co-optimization of multi-energy system operation, district heating/cooling

- network and thermal comfort management for buildings», *Appl Energy*, вип. 302, с. 117480, Лис 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117480.
- [16] S. Bordignon, G. Emmi, A. Zarrella, i M. De Carli, «Energy analysis of different configurations for a reversible ground source heat pump using a new flexible TRNSYS Type», *Appl Therm Eng*, вип. 197, с. 117413, Жов 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117413.
- [17] A. Walch *et al.*, «Shallow geothermal energy potential for heating and cooling of buildings with regeneration under climate change scenarios», *Energy*, вип. 244, с. 123086, Квіт 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.123086.
- [18] M. Fiorentini i L. Baldini, «Control-oriented modelling and operational optimization of a borehole thermal energy storage», *Appl Therm Eng*, вип. 199, с. 117518, Лис 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117518.
- [19] A. R. Puttige, S. Andersson, R. Östin, i T. Olofsson, «Modeling and optimization of hybrid ground source heat pump with district heating and cooling», *Energy Build*, вип. 264, с. 112065, Чер 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112065.
- [20] Богза М.С., Волощук В.А. Застосування методів машинного навчання у задачах моделювання динаміки теплонасосних установок // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2024. – Т.35(74), №4. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.4/09.
- [21] Богза М.С., Волощук В.А. Розробка та інтеграція моделі теплового насоса на основі нейронної мережі в середовище Simulink для моделювання системи опалення будинку // «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів». – №4, том 16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i4.2884>
- [22] Богза М.С., Волощук В.А., Некрашевич О.В., Гікало П.В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «повітря-вода» // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні

- науки. – №3, том 34, 2023. – С. 36-44. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
- [23] Богза М.С., Волощук В.А., Некрашевич О.В., Гікало П.В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «вода-вода» // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – №6, том 34, 2023. – С. 184-192. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.6/27.
- [24] Tosin Michael Olatunde, Azubuike Chukwudi Okwandu, Dorcas Oluwajuwonlo Akande, i Zamathula Queen Sikhakhane, «Review of energy-efficient HVAC technologies for sustainable buildings», *International Journal of Science and Technology Research Archive*, вип. 6, вип. 2, с. 012–020, Квіт 2024, doi: 10.53771/ijstra.2024.6.2.0039.
- [25] F. Madonna i F. Bazzocchi, «Annual performances of reversible air-to-water heat pumps in small residential buildings», *Energy Build*, вип. 65, с. 299–309, Жов 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.06.016.
- [26] X. Xiang i M. Ma, «Monitoring the carbon emissions transition of global building end-use activity», Трав 2024.
- [27] Z. Ye i V. Holubec, «Maximum efficiency of low-dissipation heat pumps at given heating load», Груд 2021, doi: 10.1103/PhysRevE.105.024139.
- [28] S. S. Du, Y. Cui, Q. H. Sun, Y. Deng, i X. W. Zhang, «Performance analysis of ground source heat pump systems for constant temperature and humidity air conditioning in industrial buildings: a case study», *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, вип. 1372, вип. 1, с. 012020, Лип 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1372/1/012020.
- [29] G. Contributor, “Heat pump water heaters — game changers in efficiency,” CleanTechnica, Apr. 27, 2020. [Online]. Available: <https://cleantechnica.com/2020/04/26/heat-pump-water-heaters-game-changers-in-efficiency>
- [30] P. Olasolo-Alonso, L. M. López-Ochoa, J. Las-Heras-Casas, i L. M. López-González, «Energy Performance of Buildings Directive implementation in

- Southern European countries: A review», *Energy Build*, вип. 281, с. 112751, Лют 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112751.
- [31] D. Konovalov, H. Kobalava, M. Radchenko, M. Karpoff, i Y. Shapovalov, «Energy Efficiency of Combined Heating Systems Based on Heat Pumps for Private Residential Buildings Under the Climatic Conditions of Ukraine», 2024, с. 531–540. doi: 10.1007/978-3-031-42778-7_49.
- [32] S. Bae, S. Chae, i Y. Nam, «Performance Analysis of Integrated Photovoltaic-Thermal and Air Source Heat Pump System through Energy Simulation», *Energies (Basel)*, вип. 15, вип. 2, с. 528, Січ 2022, doi: 10.3390/en15020528.
- [33] F. Ochs, M. Magni, i G. Dermentzis, «Integration of Heat Pumps in Buildings and District Heating Systems—Evaluation on a Building and Energy System Level», *Energies (Basel)*, вип. 15, вип. 11, с. 3889, Трав 2022, doi: 10.3390/en15113889.
- [34] F. Alsouda, N. S. Bennett, S. C. Saha, F. Salehi, i M. S. Islam, «Vapor Compression Cycle: A State-of-the-Art Review on Cycle Improvements, Water and Other Natural Refrigerants», *Clean Technologies*, вип. 5, вип. 2, с. 584–608, Трав 2023, doi: 10.3390/cleantechnol5020030.
- [35] C. S. Blázquez, I. M. Nieto, J. C. García, P. C. García, A. F. Martín, i D. González-Aguilera, «Comparative Analysis of Ground Source and Air Source Heat Pump Systems under Different Conditions and Scenarios», *Energies (Basel)*, вип. 16, вип. 3, с. 1289, Січ 2023, doi: 10.3390/en16031289.
- [36] T. Koopman, T. Zhu, i W. Rohlf, «Performance evaluation of air-source heat pump based on a pressure drop embedded model», *Heliyon*, вип. 10, вип. 4, с. e24634, Лют 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24634.
- [37] Y. Tang, «Heat Transfer and Thermal Analysis with Computational Fluid Dynamics», в *Computational Fluid Dynamics - Analysis, Simulations, and*

- Applications [Working Title]*, IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.1006819.
- [38] C. Bacuta i C. Bacuta, «Connections Between Finite Difference and Finite Element Approximations for a Convection-Diffusion Problem», Лют 2024.
 - [39] F. S. Fadnes, R. Banihabib, i M. Assadi, «Using Artificial Neural Networks to Gather Intelligence on a Fully Operational Heat Pump System in an Existing Building Cluster», *Energies (Basel)*, вип. 16, вип. 9, с. 3875, Трав 2023, doi: 10.3390/en16093875.
 - [40] S. A. Bortoff, H. Qiao, i C. R. Laughman, «Modeling and Control of a Multi-Mode Heat Pump», в *2024 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, IEEE, Сер 2024, с. 539–546. doi: 10.1109/CCTA60707.2024.10666618.
 - [41] C. Manière, G. Lee, i E. A. Olevsky, «Proportional integral derivative, modeling and ways of stabilization for the spark plasma sintering process», Лис 2020, doi: 10.1016/j.rinp.2017.04.020.
 - [42] S. woo Ham, L. Paul, D. Kim, M. Pritoni, R. Brown, i J. Feng, «Decarbonization of heat pump dual fuel systems using a practical model predictive control: Field demonstration in a small commercial building», *Appl Energy*, вип. 361, с. 122935, Трав 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122935.
 - [43] R. Agner, P. Gruber, i B. Wellig, «Model Predictive Control of Heat Pumps with Thermal Energy Storages in Industrial Processes», *Energies (Basel)*, вип. 17, вип. 19, с. 4823, Вер 2024, doi: 10.3390/en17194823.
 - [44] C. Bersani, M. Fossa, A. Priarone, R. Sacile, i E. Zero, «Model Predictive Control versus Traditional Relay Control in a High Energy Efficiency Greenhouse», *Energies (Basel)*, вип. 14, вип. 11, с. 3353, Чер 2021, doi: 10.3390/en14113353.
 - [45] M. Fan, H. Cheng, M. Nian, i S. Xie, «Performance Study of Intermittent Heating Mode Combining Air-Source Heat Pump with Radiator in Hot

- Summer and Cold Winter Zones of China», *Advances in Civil Engineering*, вип. 2024, вип. 1, Січ 2024, doi: 10.1155/2024/1661363.
- [46] T. Aditya Sai Srinivas, A. David Donald, M. Sameena, K. Rekha, i I. Dwaraka Srihith, «Unlocking the Power of Matlab: A Comprehensive Survey», *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, с. 20–31, Квіт 2023, doi: 10.48175/IJARSCT-9005.
- [47] A. Al-Manea, R. Al-Rbaihat, Hakim. T. Kadhim, A. Alahmer, T. Yusaf, i K. Egab, «Experimental and numerical study to develop TRNSYS model for an active flat plate solar collector with an internally serpentine tube receiver», *International Journal of Thermofluids*, вип. 15, с. 100189, Сер 2022, doi: 10.1016/j.ijft.2022.100189.
- [48] M. Sharifishourabi, I. Dincer, i A. Mohany, «Performance assessment of a novel solar heliostat and digester-based multigeneration system with hydrogen production», *Appl Therm Eng*, вип. 232, с. 121094, Бер 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121094.
- [49] S. A. Muslim, «EnergyPlus-Towards the Selection of Right Simulation Tool for Building Energy and Power Systems Research», *Journal of Energy and Power Technology*, вип. 03, вип. 03, с. 1–1, Лют 2021, doi: 10.21926/jept.2103034.
- [50] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, i V. Lemort, «Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp», *Ind Eng Chem Res*, вип. 53, вип. 6, с. 2498–2508, Лют 2014, doi: 10.1021/ie4033999.
- [51] Y. Yao, M. Huang, i J. Chen, «State-space model for dynamic behavior of vapor compression liquid chiller», *International Journal of Refrigeration*, вип. 36, вип. 8, с. 2128–2147, Груд 2013, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.05.006.

- [52] I. Malashin, V. Tynchenko, A. Gantimurov, V. Nelyub, i A. Borodulin, «Applications of Long Short-Term Memory (LSTM) Networks in Polymeric Sciences: A Review», *Polymers (Basel)*, вип. 16, вип. 18, с. 2607, Бер 2024, doi: 10.3390/polym16182607.
- [53] W. Zhang, Z. Li, i Y. Tian, «Research on Temperature Prediction Based on RF-LSTM Modeling», 04, Січень 2025. doi: 10.36227/techrxiv.173603336.69370585/v1.
- [54] T. O. Hodson, «Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not», *Geosci Model Dev*, вип. 15, вип. 14, с. 5481–5487, Лип 2022, doi: 10.5194/gmd-15-5481-2022.
- [55] M. Al-Aghbary, M. Sobh, i C. Gerhards, «A geothermal heat flow model of Africa based on random forest regression», *Front Earth Sci (Lausanne)*, вип. 10, Бер 2022, doi: 10.3389/feart.2022.981899.
- [56] Y. Wang, C. Zhan, G. Li, D. Zhang, i X. Han, «Physics-guided LSTM model for heat load prediction of buildings», *Energy Build*, вип. 294, с. 113169, Бер 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113169.
- [57] R. Heckel i F. F. Yilmaz, «Early Stopping in Deep Networks: Double Descent and How to Eliminate it», Лип 2020.
- [58] O. Ferludin *et al.*, «TF-GNN: Graph Neural Networks in TensorFlow», Лип 2022.
- [59] A. Bhattacharjee, A. A. Popov, A. Sarshar, i A. Sandu, «IMPROVING ADAM THROUGH AN IMPLICIT-EXPLICIT (IMEX) TIME-STEPPING APPROACH», *Journal of Machine Learning for Modeling and Computing*, вип. 5, вип. 3, с. 47–68, 2024, doi: 10.1615/JMachLearnModelComput.2024053508.
- [60] R. Elshamy, O. Abu-Elnasr, M. Elhoseny, i S. Elmougy, «Improving the efficiency of RMSProp optimizer by utilizing Nesterov in deep learning», *Sci Rep*, вип. 13, вип. 1, с. 8814, Трав 2023, doi: 10.1038/s41598-023-35663-x.

- [61] R. Conlin, K. Erickson, J. Abbate, i E. Kolemen, «Keras2c: A library for converting Keras neural networks to real-time compatible C», *Eng Appl Artif Intell*, вип. 100, с. 104182, Квіт 2021, doi: 10.1016/j.engappai.2021.104182.
- [62] J. Heaton, «Applications of Deep Neural Networks with Keras», Бер 2020.
- [63] J. Kočí *et al.*, «Analysis of the Effect of Relative Humidity on the Convective Heat Transfer Coefficient Using Full-Scale Experiments in a Climatic Wind Tunnel», *Energies (Basel)*, вип. 18, вип. 4, с. 810, Лют 2025, doi: 10.3390/en18040810.
- [64] B. Li, Z. Chen, i R. B. Chandran, «Conductive and Radiative Heat Transfer Mechanisms Inform Nusselt Number Dependence on Solid Volume Fraction for Granular Flows», Бер 2024.
- [65] Y. Sun, T. Zhao, i S. Lyu, «Model-based investigation on building thermal mass utilization and flexibility enhancement of air conditioning loads», *Build Simul*, вип. 17, вип. 8, с. 1289–1308, Сер 2024, doi: 10.1007/s12273-024-1143-4.
- [66] V. A. Arowoia, A. O. Onososen, R. C. Moehler, i Y. Fang, «Influence of Thermal Comfort on Energy Consumption for Building Occupants: The Current State of the Art», *Buildings*, вип. 14, вип. 5, с. 1310, Трав 2024, doi: 10.3390/buildings14051310.
- [67] L. Luqman, S. Madenda, i P. Prihandoko, «Polynomial Regression Model Utilization to Determine Potential Refuse-Derived Fuel (RDF) Calories in Indonesia», *Energies (Basel)*, вип. 16, вип. 20, с. 7200, Жов 2023, doi: 10.3390/en16207200.

ДОДАТКИ ДОДАТОК А

Авторське свідоцтво на комп'ютерну програму «Ексергетичне діагностування неполадок у компонентах теплового насосу» №123490 від 05.02.2024.

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 123490

Комп'ютерна програма «Ексергетичне діагностування неполадок у компонентах теплового насосу»

(вид, назва твору)

Автор (співавтори) **Богза Микола Сергійович, Волощук Володимир Анатолійович, Некрашевич Олена Василівна**

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать повністю **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056**

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 5 лютого 2024 р.

Директор Державної організації
«Український національний
офіс інтелектуальної власності
та інновацій»


Олена ОРЛЮК



ДОДАТОК Б

Акт про використання в навчальному процесі кафедри
Автоматизації енергетичних процесів НН ІАТЕ КПІ ім. Ігоря
Сікорського результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Навчально-наукового
Інститут атомної та
теплової енергетики
Національного технічного
університету України

Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”
Євген ПИСЬМЕННИЙ

АКТ

Про використання в навчальному процесі кафедри
Автоматизації енергетичних процесів НН ІАТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського
результатів дисертаційної роботи Богзи Миколи Сергійовича на тему
«Автоматизація процесу керування адаптивною системою переривчастого
теплозабезпечення будинку із застосуванням оптимальних уставок регулятора»

Комісія у складі завідувача кафедри АЕП НН ІАТЕ Волощука В.А. та викладачів кафедри к.т.н., доц. Багана Т.Г., к.т.н., доц. Степанця О.В. розглянула можливість використання матеріалів результатів дисертаційної роботи Богзи М. С. під час підготовки спеціалістів зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

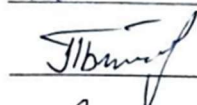
На основі результатів перевірки ухвалили використати результати дисертаційної роботи Богзи М. С. в навчально-методичних матеріалах кафедри, а саме в рамках вивчення дисципліни «Математичне моделювання систем і процесів».

Голова комісії

Члени комісії



Володимир ВОЛОЩУК



Тарас БАГАН



Олександр СТЕПАНЕЦЬ