

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

**Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики
Кафедра автоматизації енергетичних процесів**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Володимир ВОЛОЩУК
«__» _____ 20__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Автоматизована система повітряного опалення для приватного будинку»**

Виконав :

Студент 4 курсу, групи ТА-11

Червоний Андрій Сергійович _____

Керівник:

Доцент, к.т.н.

Голінко Ігор Михайлович _____

Консультант з розділу «Охорона праці»:

Доцент, к.т.н.

Каштанов Сергій Федорович _____

Рецензент: _____

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

Студент _____

Київ – 2025 року

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

**Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики
Кафедра автоматизації енергетичних процесів**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Володимир ВОЛОЩУК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

**на дипломний проєкт студенту
Червоному Андрію Сергійовичу**

1. Тема проєкту «Автоматизована система повітряного опалення для приватного будинку», керівник проєкту Голінко Ігор Михайлович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «02» червня 2025 р. № 1875-с
2. Термін подання студентом проєкту «12» червня 2025 р.
3. Вихідні дані до проєкту: Система повітряного опалення для приватного будинку. Матеріали з переддипломної практики, літературний огляд математичної моделі повітряного опалення приміщення.
4. Зміст пояснювальної записки: 1.Опис системи повітряного опалення для приватного будинку 2.Математичне моделювання температурного режиму в приміщенні 3.Розробка контуру регулювання температури в приміщенні 4.Технічна реалізація системи повітряного опалення 5.Охорона праці 6.Техніко-економічний розрахунок ефективності.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Функціональна схема автоматизації (1 арк. ф. А2); схема принципова електрична (1 арк. ф. А3); креслення загального виду щита автоматизації (1 арк. ф. А3); схема з'єднань та підключень зовнішніх проводок (1 арк. ф. А2), специфікація обладнання (2 арк. ф. А3).

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каштанов С.Ф., доцент, к.т.н	20.05	29.05

7. Дата видачі завдання 13.05.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Отримання теми дипломного проєкту	13.05	
2.	Створення схеми автоматичної функціональної, схеми електричної принципової	15.05	Аркуш 1, Аркуш 2
3.	Опис системи повітряного опалення для приватного будинку	17.05	Розділ 1
4.	Математичне моделювання температурного режиму в приміщенні	22.05	Розділ 2
5.	Розробка контуру регулювання температури в приміщенні	28.05	Розділ 3
6.	Охорона праці	29.05	Розділ 5
7.	Технічна реалізація системи повітряного опалення	04.06	Розділ 4
8.	Створення креслення загального виду щита автоматизації, схема з'єднань та підключень зовнішніх проводок	06.06	Аркуш 3, Аркуш 4
9.	Техніко-економічний розрахунок ефективності	08.06	Розділ 6
10.	Подання ДП на перевірку	09.06	

Студент

Андрій, Червоний

Керівник

Ігор, Голінко

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт виконаний на тему: «Автоматизована система повітряного опалення для приватного будинку». В ході виконання проєкту було розроблено систему повітряного опалення для регулювання температури у приміщеннях приватного будинку.

Для даної роботи було виконано ряд поставлених задач. Для першого розділу було виконано опис системи повітряного опалення для приватного будинку, де розглянули принцип роботи, переваги та недоліки системи, контури регулювання, а також основні характеристики системи опалення. Після чого в другому розділі було проведено математичне моделювання температурного режиму в приміщенні звідки було отримано модель об'єкта керування. В третьому розділі проведено розрахунок регулятора двома методами та обрано найкращий, також розраховано надійність системи. Четвертий розділ присвячений створенню програмного забезпечення та розробці SCADA-системи. В п'ятому розділі наведено заходи для охорони праці та уникненню травматичних та аварійних ситуацій. Розділ номер шість показує економічну ефективність системи та кошторис для її побудови.

Ключові слова: повітряна система опалення, регулювання температури, калорифер.

ANNOTATION

The diploma project was completed on the topic: «Automated air heating system for the private house». In the course of the project, an air heating system was developed to regulate the temperature in the premises of a private house.

For this work, a number of tasks were completed. For the first section, a description of the air heating system for a private house was made, where the principle of operation, advantages and disadvantages of the system, control loops, and the main characteristics of the heating system were considered. After that, in the second section, the mathematical modelling of the temperature regime in the room was carried out, from which the model of the control object was obtained. In the third section, the controller was calculated using two methods and the best one was chosen, and the system reliability was calculated. The fourth section is devoted to the creation of software and development of the SCADA system. The fifth section presents measures for labour protection and the avoidance of injuries and accidents. Section six shows the economic efficiency of the system and the cost estimate for its construction.

Keywords: air heating system, temperature control, heat.

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизована система повітряного опалення
для приватного будинку»

Київ – 2025 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
1 ОГЛЯД СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	11
1.1 Огляд технологічного процесу опалення для приватного будинку	11
1.2 Аналіз переваг і недоліків сучасних систем опалення приватного будинку.....	15
1.3 Аналіз систем керування для процесу повітряного опалення приватного будинку.....	18
1.4 Основні характеристики системи повітряного опалення приватного будинку.....	23
1.5 Постановка задачі автоматизації для системи повітряного опалення	27
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ПРИМІЩЕННІ	8
2.1 Розробка аналітичної моделі динамічного режиму температури у приміщенні.....	8
2.2 Дослідження перехідних процесів температури у приміщенні.....	8
2.3 Моделювання перехідних характеристик для розширеного ОК	8
2.4 Апроксимація розширеного ОК спрощеною математичною моделлю	8
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ОПАЛЕННЯ В ПРИМІЩЕННІ.....	8
3.1 Структурна схема АСР температури у приміщенні.....	8
3.2 Розрахунок АСР температури в приміщенні методом 20%	8
3.3 Розрахунок АСР температури у приміщенні методом РАФХ.....	9
3.4 Аналіз отриманих результатів.....	8

Інв. №	Підпис і дата	Зам. інв.	ТА-11394.0014.001.АТХ.П							
			Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата	Літ.	Аркуш
			Розроб.	Червоний А.С.			Пояснювальна записка	ДП	7	85
			Перевірив	Голінко І.М.						
			Т. контр.							
			Н. контр.	Голінко І.М.						
			Затв.	Волощук В.А.						
КПІ ім. І. Сікорського, ІАТЕ, зр. ТА-11										

3.5 Розрахунок надійності системи.....	8
4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМИ ПОВІТРЯНОГО ОПАЛЕННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ	8
4.1 Технічні рішення контролю параметрів повітряної системи опалення приватного будинку.....	8
4.2 Технічні рішення регулювання параметрів повітряної системи опалення приватного будинку	8
4.3 Опис контролера Phoenix contact ILC 151 ETH.....	8
4.4 Програмні рішення управління повітряною системою опалення приватного будинку.....	8
4.5 Розробка інформаційно керуючої системи	8
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	8
5.1 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації технологічного устаткування та засобів автоматизації	8
5.1.1 Електробезпека	8
5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з гігієни праці та виробничої санітарії	9
5.2.1 Мікроклімат	9
5.2.2 Склад повітря робочої зони	8
5.2.3 Виробниче освітлення	8
5.2.4 Виробничий шум	8
5.2.5 Виробничі вібрації.....	8
5.2.6 Виробничі випромінювання	8
5.3 Пожежна безпека та профілактика.....	8
5.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі	8
5.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	8
6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ	9
ВИСНОВОК.....	8
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	8

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВМ – виконавчий механізм

ПЛК – програмований логічний контролер

РО – регулюючий орган

ОК – об'єкт керування

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
							9
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	П і д н .	Дата		

ВСТУП

Особливої актуальності наразі набувають питання енергоефективності, комфорту проживання та рішення з автоматизації процесів в побуті. Важливою складовою сучасного будівництва житла є системи опалення, які також підлягають автоматизації та збільшенню їх ефективності в умовах зростання вартості енергоресурсів.

Особливої уваги заслуговують повітряні системи опалення, що мають перевагу серед інших систем у вигляді високої швидкодії та можливості в поєднанні з системою вентиляції. Використання приточно-рециркуляційних систем повітряного опалення, які мають автоматизоване керування, дозволяють підтримувати зручні умови в кожному приміщенні будинку відповідно до потреб мешканців. Також повітряні системи легко інтегруються з вентиляційними та охолоджувальними установками, які в сумі утворюють універсальний багатофункціональний комплекс.

Окрему роль відіграють приточно-рециркуляційні системи, які здатні використовувати як зовнішнє повітря з вулиці, так і внутрішнє повітря з будинку. Це дозволяє додатково знизити витрати тепла та підвищити загальну енергоефективність системи. У поєднанні з автоматизованим керуванням такі системи стають важливою складовою сучасного інтелектуального будинку в якому усе працює точно з мінімально можливими витратами.

У сучасних реаліях в Україні відбувається відмова від централізованого теплопостачання та надається перевага автономним системам опалення, що надає певні плюси для розробки та впровадження таких систем у маси.

Отже, автоматизація повітряних систем опалення є не лише актуальною інженерною задачею, але й необхідною умовою для ефективного, надійного та зручного функціонування сучасного приватного будинку.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		10

1 ОГЛЯД СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Огляд технологічного процесу опалення для приватного будинку

В сучасних приватних будинках для опалення частіше всього використовуються такі види опалення як водяне та повітряне. Такі системи виконують одну спільну задачу, а саме забезпечення необхідного рівня температури в приміщеннях будівлі для забезпечення комфорту мешканців, але дані системи реалізуються за допомогою різних принципів.

Розглянемо основні системи опалення, які використовуються в сучасних приватних будинках:

Водяне опалення. Це класичний та найпоширеніший вид опалення. Дана система складається з котла, водопроводу, радіаторів або системи теплої підлоги яка набуває популярності в сучасних будинках, а також різної трубопровідної арматури. Основним теплоносієм в даній системі є вода або водно-гліколева суміш, яка циркулює по замкнутому контуру тим самим передаючи тепло від теплоносія до приміщень. Дану систему можна побачити на рис. 1.1.

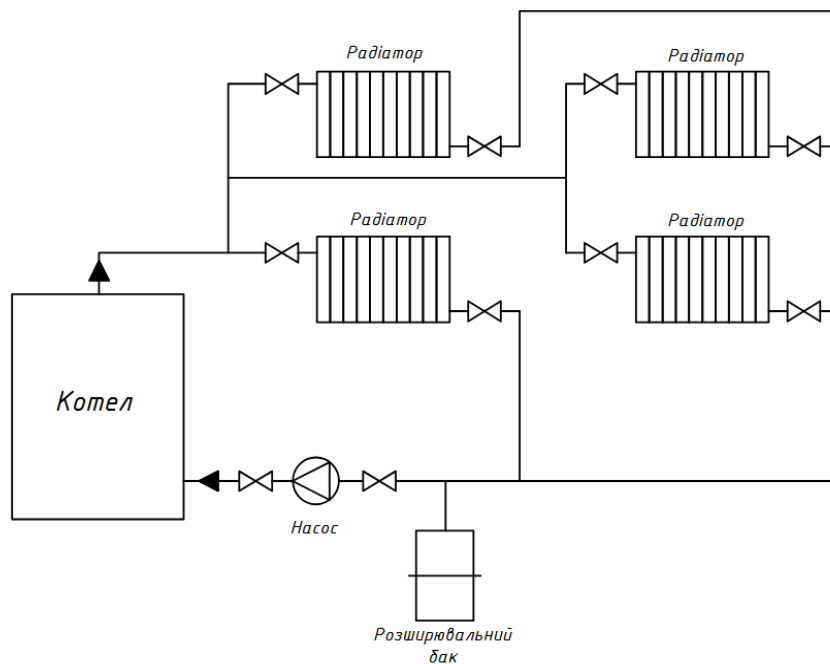


Рис. 1.1 - Система водяного опалення на базі радіаторів

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		11

Починається робота водяної системи опалення з того, що джерело тепла, в даній системі це газовий, електричний або твердопаливний котел нагріває теплоносії, яким є вода, до заданої температури, яка зазвичай має значення від 50 до 80 °С. Якщо використовується система теплої підлоги, то температура буде нижчою, а саме в районі від 35 до 45 °С, але є системи теплої підлоги які використовують і більші температури. Після нагрівання вода потрапляє до трубопроводу за допомогою циркуляційного насоса, який забезпечує її безперервний рух в контурі системи, даний насос використовується лише у будівлях які мають два чи більше поверхів, або при доволі великих розмірах трубопроводу, через що вода не може рівномірно циркулювати по всьому контуру.

Теплоносії надходить до опалювальних приладів, зазвичай ними є панельні або секційні радіатори, а також труби в конструкції "тепла підлога". Для кожного приміщення встановлюється певна кількість радіаторів, це розраховується за тепловими витратами. Радіатор через свою поверхню передає тепло нагрітої води повітрю, яке за рахунок конвекції рівномірно підігріває простір в приміщенні.

Після того, як вода віддає своє тепло через радіатор повітрю, вже охолоджена, вона повертається за допомогою зворотного трубопроводу назад до джерела тепла, продовжуючи циркуляцію в системі та повторюючи процес нагрівання і охолодження. Для забезпечення стабільності температури в кожному приміщенні використовується РО який змінює подачу сигналу на ВМ для контролю обсягів теплоносія, що поступає до радіаторів.

Для запобігання зміни об'єму води в системі при нагріванні, в дану систему встановлюють розширювальний бак, який дозволяє компенсувати дані зміни для забезпечення достатньої кількості води в системі опалення.

У підсумку, водяна система опалення працює за замкнутим контуром в якому циркулює теплоносії який віддає тепло приміщенню та нагрівається знову, що підтримує температуру в приміщеннях та опалює їх.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	П і д н.	Дата		12

Повітряне опалення. Працює за допомогою подачі нагрітого повітря до приміщень через повітропроводи. Складається дана система з повітряного нагрівача, каналних вентиляторів, повітропроводу, фільтрів та РО. Окрім такої функції як опалення, система може виконувати ще й функцію вентиляції та кондиціювання, що робить її універсальним рішенням для сучасних приватних будинків. Схему можна побачити на рис. 1.2.

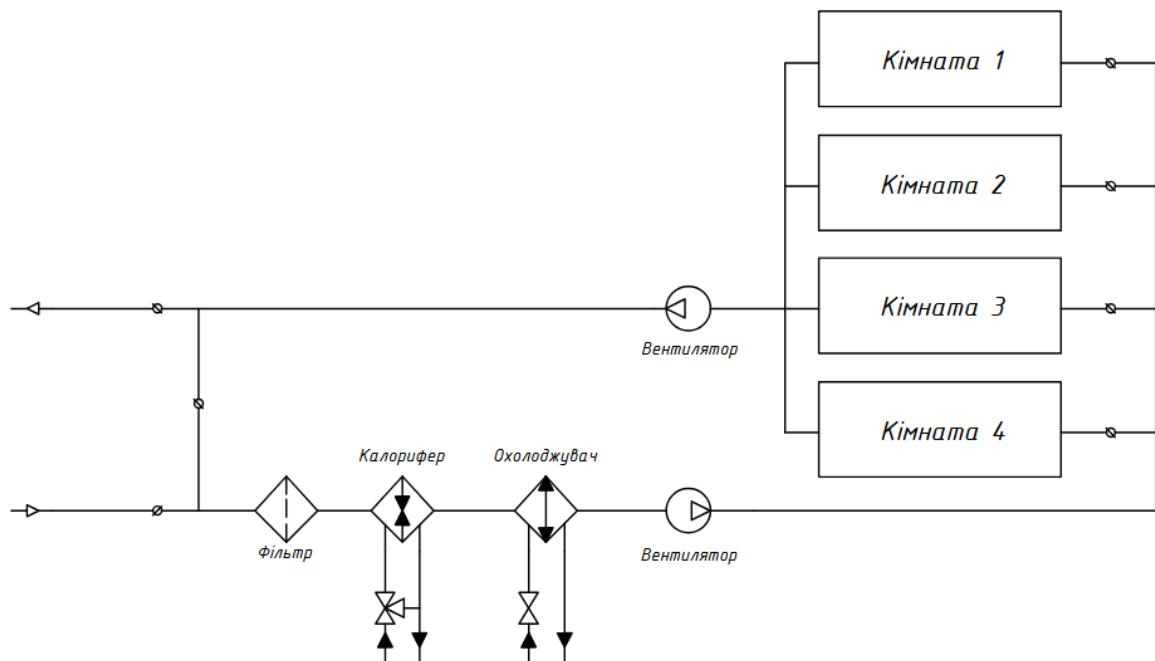


Рис. 1.2 - Система повітряного опалення з рециркуляцією

Джерелом тепла в повітряній системі опалення є електричний нагрівач, газовий пальник або водяний калорифер, такі прилади забезпечують нагрівання повітря до заданої температури. Починається робота системи зі збору свіжого повітря з вулиці за допомогою припливної системи, також в системі використовується рециркуляційне повітря, яке повертається в систему з приміщень будинку для повторного використання. Повітря потрапляє до центрального нагрівача крізь фільтр, тим самим очищаючись, де нагрівається, далі підходить до охолоджувача який при потребі може охолодити поступаюче повітря до потрібного значення.

Після того, як повітря буде доведено до необхідної температури, воно поступає до приміщень в будинку за допомогою каналного вентилятора прямуючи по повітропроводу де розділяється на різні канали для подачі в певні приміщення. Далі через спеціальні вентиляційні решітки або дифузори тепле повітря потрапляє до приміщень. Розподіл може бути рівномірним або зонованим в залежності від конфігурації системи та встановлених повітряних заслінок з сервоприводами. Після потрапляння в приміщення повітря витягується із системи, або починає рециркулювати в ній, повторюючи процес.

Кожне приміщення оснащено температурним датчиком або термостатом, дані прилади вимірюють поточну температуру в приміщенні та передають сигнал до ПЛК, який в свою чергу керує інтенсивністю нагріву повітря та положенням заслінок встановлених в повітропроводах що ведуть у приміщення, таким чином регулюючи кількість повітря, що поступає до кожної кімнати.

Коли система досягає необхідної температури, вона зменшує інтенсивність нагрівання, або припиняє його і лише залишає включеними вентилятори для циркуляції повітря в системі. При рециркуляції частина повітря повертається по зворонім каналам до нагрівача, а інша може виводитись із системи.

Повітряна система опалення має низьку теплову інерцію, за рахунок цього температура у приміщенні змінюється дуже швидко після встановлення іншого значення, що дає ефективно змінювати температуру в приміщеннях.

Окрім цього, система може працювати в режимі припливно-витяжної вентиляції, в такому випадку система закриває заслінку для рециркуляції та відкриває заслінки для подачі та виводу повітря із системи, оновлюючи його.

У підсумку повітряна система опалення працює за замкнутим контуром в якому циркулює повітря, що переносить тепло від калорифера до кімнат і повертається назад для повторного нагріву за рахунок чого підтримується постійна температура в приміщеннях.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		14

1.2 Аналіз переваг і недоліків сучасних систем опалення приватного будинку

Враховуючи сучасне зростання вимог щодо комфорту та енергоефективності будівель в Україні та Європі, на даний момент доволі активно розвиваються автоматизація та системи опалення, які використовують елементи автоматизації. При умовах часткової відмови від централізованого опалення, через нинішні обставини, а також переходу на індивідуальні джерела опалення в приватних секторах, автоматизовані системи повітряного опалення мають певні переваги перед альтернативними рішеннями для забезпечення опалення в приватних будівлях, а також відповідають нинішнім потребам в зручності та енергоефективності..

Розглянемо основні сучасні системи опалення.

Водяне опалення. На даний момент є найпоширенішою системою опалення в Україні та Європі для приватних будинків, багатоповерхівок та громадських будівель. Використовується в автономних та централізованих системах опалення.

Перевагами є:

- довго зберігає тепло навіть після вимкнення опалення;
- забезпечення однакової температури в усіх приміщеннях;
- безшумність роботи;
- підвищені терміни експлуатації.

Серед недоліків є:

- температура в приміщеннях змінюється доволі довго;
- необхідний постійний контроль у зимовий час для запобігання замерзання теплоносія в трубопроводі;
- присутні складності в монтажі в уже збудованих будівлях та впливає на дизайн приміщень та будівлі;
- потребує періодичного техобслуговування;
- присутній ризик протікання на пошкодження трубопроводу;
- необхідність видалення води перед консервацією системи.

						ТА - 11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		15

Повітряне опалення. Найчастіше використовується у приватних будинках, торгових центрах, офісах, складських приміщеннях та ангарах. Має популярність у США та Канаді.

Перевагами є:

- можливість швидко змінити температуру приміщення;
- наявність високого ККД в 93%;
- універсальність системи дозволяє поєднати опалення з вентиляцією та охолодженням;
- відсутність труб і радіаторів, лише наявність повітропроводів, що полегшує монтаж та не заважає інтер'єру;
- простота та довговічність конструкції;
- низькі експлуатаційні витрати;
- легко створювати та керувати системою.

Серед недоліків є:

- шум від вентиляторів і заслінок;
- повітряний потік може поширювати пил;
- система встановлюється на етапі будівництва будівлі;
- високі витрати на встановлення;
- менша теплова інерція, за рахунок чого приміщення швидко охолоджується після вимкнення системи;
- менш рівномірний розподіл тепла, особливо порівнюючи з водяною системою.

Парове опалення. Майже не застосовується в сучасному житті. Може використовуватись на промислових об'єктах, заводах, виробничих цехах та в теплицях.

Перевагами є:

- висока теплова потужність, що дозволяє швидко підігрівати будинок незалежно від його площі;

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		16

- відсутність втрат тепла в теплообмінниках, що робить використання пари доцільним там, де вона є побічним продуктом виробництва;
- менше споживання теплоносія при порівнянні з водяними системами на великих об'єктах використовується менше теплоносія, також дозволяє використати пару для декількох циклів підігріву.

Серед недоліків є:

- висока температура і тиск, що потребує високого контролю безпеки;
- недовгий термін служби системи через конденсат і навантаження елементи швидко стають непридатними;
- немає можливості регулювання температури всередині будинку.

За умов війни в Україні через руйнування централізованої інфраструктури збільшується потреба в надійних та автономних системах опалення, які можна доволі просто реалізувати. Повітряні системи опалення легко масштабуються та не потребують значних витрат для прокладання повітропроводів. Також дану систему доволі просто підтримувати в робочому стані, оскільки повітропроводи легко очищаються та перевіряються на несправності.

У 2025 році в Україні активно реалізуються європейські підходи, що стосуються енергозабезпечення та декарбонізації побутового сектора. Повітряні системи опалення доволі гарно вписуються в сучасні потреби, вони є ефективним способом для досягнення та підтримки необхідного рівня тепла в приміщеннях будинку. Окрім цього, дана система може виступати в якості вентиляції для забезпечення потрібного рівня свіжого повітря в будівлі.

Отже, дана тема є перспективною, оскільки задовольняє сучасні потреби у даній сфері. Вона дає реалізувати ефективне та гнучке рішення для опалення приватного будинку та створює простір для подальшого розвитку цього напрямку.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		17

1.3 Аналіз систем керування для процесу повітряного опалення приватного будинку

Система автоматичного повітряного опалення у приватному будинку, яка реалізована за принципом приточно-рециркуляційної вентиляції, потребує точного та багаторівневого керування. Такий підхід дозволяє не лише підтримувати комфортну температуру, але й забезпечувати свіже повітря, керувати об'ємами повітрообміну, знижувати споживання електроенергії та адаптуватися до потреб користувачів.

Регулювання температури повітря в каналі після нагрівача. У повітряній системі опалення з рециркуляцією ключовим технологічним завданням є підтримання стабільної температури повітря, що подається в систему та проходить через калорифер та охолоджувач. Це необхідно для забезпечення комфортного мікроклімату та недопущення невідповідної температури повітря в приміщенні.

Після змішування зовнішнього повітря та того, що циркулює в системі, дане повітря надходить у калорифер, де відбувається його підігрів. На виході з нагрівача встановлюється датчик температури повітря (див. рисунок 1.3, позиція 1а), який вимірює поточну температуру повітряного потоку. Сигнал з цього датчика надходить до ПЛК, який порівнює його з заданим значенням температури, яке встановлюється за допомогою системи керування.

Коли виміряна температура нижча за задану, а також температура повітря на вулиці (див. рисунок 1.3, позиція 1е) менша за необхідну формується сигнал на регулятор температури (див. рисунок 1.3, позиція 1б), який керує клапаном (див. рисунок 1.3, позиція 1г) і збільшує подачу гарячої води в теплообмінник, що дозволяє збільшити температуру повітря яке проходить через калорифер приближаючись до заданого значення температури.

При перевищенні температури формується сигнал на регулятор температури (див. рисунок 1.3, позиція 1б) який зменшує сигнал, що призводить до зниження потужності нагріву за рахунок зменшення потоку гарячої води, що поступає до водяного теплообмінника. Таким чином, у каналі

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		18

підтримується стабільна температура повітря, незалежно від змін зовнішньої температури.

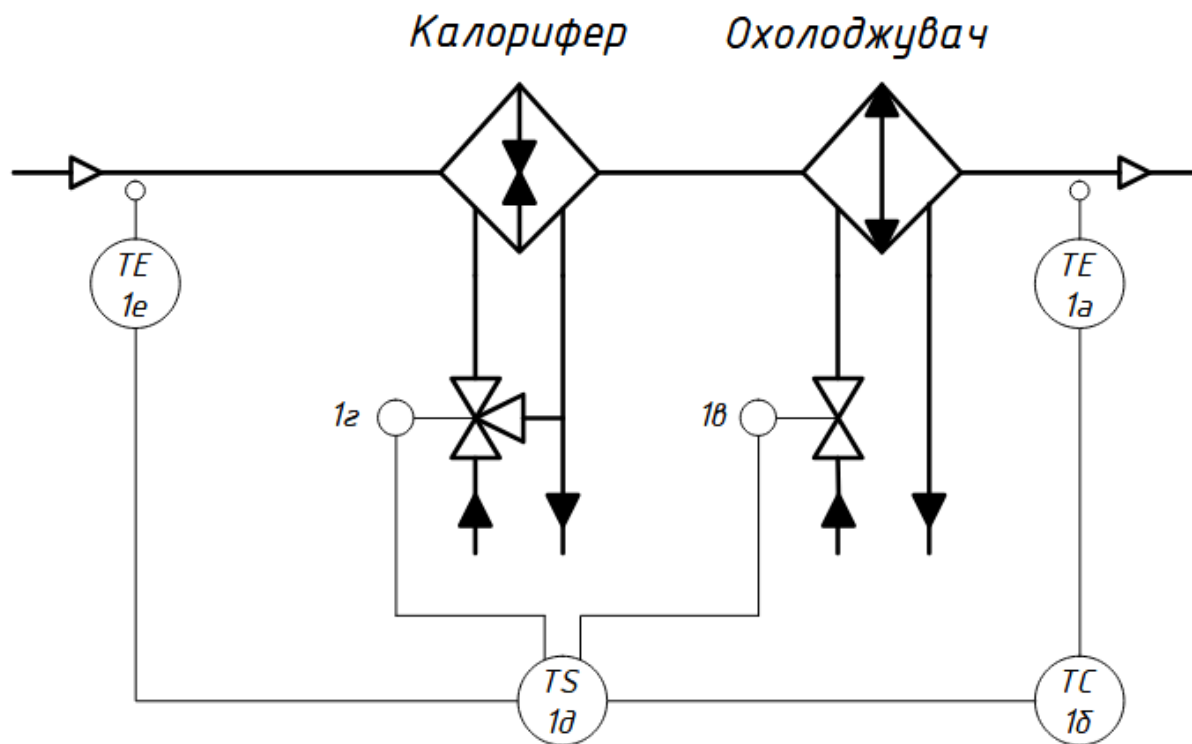


Рис. 1.3 - Регулювання температури повітря в каналі після нагрівача

Також повітряна система опалення може працювати у літній час, тоді відбувається вимкнення калориферу та включення роботи охолоджувача за допомогою перемикача (див. рисунок 1.3, позиція 1д), забезпечуючи комфортну температуру у приміщеннях за рахунок охолодження повітря, тоді подача гарячої води на калорифер зупиняється, в цей час відкривається клапан подачі холодної води (див. рисунок 1.3, позиція 1в) на охолоджувач, що дозволяє зменшити температуру в системі до заданого значення температури.

При зменшенні температури формується сигнал на регулятор температури (див. рисунок 1.3, позиція 1б) який зменшує сигнал, що призводить до зниження потужності охолодження повітря за рахунок зменшення потоку холодної води, що поступає до водяного теплообмінника. Таким чином, у каналі підтримується стабільна температура повітря, незалежно від змін зовнішньої температури.

Даний контур є критично важливим, оскільки впливає на всю систему подачі тепла в системі та комфорт користувачів.

Регулювання температури зворотнього теплоносія для водяного калорифера. У водяних системах повітряного опалення з калориферами існує ризик замерзання теплоносія в теплообміннику в умовах подачі низької температури зовнішнього повітря у систему. Для захисту системи передбачено контур регулювання температури зворотнього теплоносія, який автоматично підтримує температуру води на виході з калорифера вище критичного рівня, приблизно від 5 до 10 °С.

Датчик температури зворотнього теплоносія (див. рисунок 1.4, позиція 1а) встановлюється на зворотному трубопроводі калорифера для постійного контролю температуру води яка повертається після проходження через теплообмінник. Сигнал з цього датчика йде до ПЛК для порівняння з мінімальним допустимим значенням температури води в даному контурі.

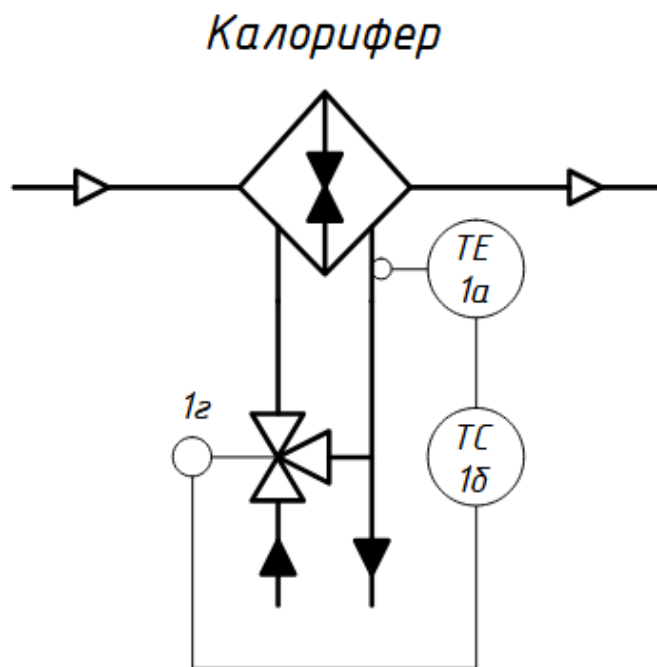


Рис. 1.4 – Регулювання температури зворотнього теплоносія водяного калорифера

Коли температура зворотнього теплоносія (див. рисунок 1.4, позиція 1а) знижується до мінімально допустимого значення, тоді формується сигнал на регулятор температури (див. рисунок 1.4, позиція 1б) для зміни положення РО (див. рисунок 1.4, позиція 1г), який розташований на подачі гарячої води до калориферу. Коли РО відкривається, тоді гаряча вода йде до калорифера, що забезпечує зростання температури в даному контурі.

Коли температура зворотнього теплоносія (див. рисунок 1.4, позиція 1а) перевищує встановлене значення, тоді регулятор температури (див. рисунок 1.4, позиція 1б) зменшує ступінь відкриття РО або закриває його повністю, що переводить систему в черговий режим. Таким чином в системі підтримується безперервна циркуляція теплоносія через калорифер за потреби, що гарантує захист теплообмінника та води в даному контурі від замерзання.

Цей контур є обов'язковим елементом будь-якої вентиляційної системи з водяним калорифером і виконує важливу функцію аварійного та чергового захисту обладнання від пошкоджень внаслідок низьких температур зовнішнього повітря, яке припливає у вентиляційну систему.

Регулювання температури повітря в кімнатах. Ще одним важливим контуром у приточно-рециркуляційній системі опалення є контур зонального регулювання температури, який забезпечує індивідуальне керування температурою в кожній кімнаті будинку. Це особливо актуально у приватному секторі, де частина кімнат може використовуватися більш рідко або в різному режимі, що вимагає різних параметрів температури.

У кожній кімнаті встановлюється кімнатний датчик температури (див. рисунок 1.5, позиція 1а), який вимірює поточну температуру повітря у приміщенні. Сигнал із цього датчика надходить до ПЛК, який порівнює фактичне значення з індивідуально заданим для кожної кімнати значенням температури.

Якщо температура в кімнаті нижча за необхідну, регулятор температури (див. рисунок 1.5, позиція 1б) формує керуючий сигнал на електропривід повітряної заслінки, встановленої у відповідній частині повітропроводу (див.

						ТА - 11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		21

рисунок 1.5, позиція 1в). Заслінка частково або повністю відкривається, дозволяючи подати більшу кількість теплого повітря до цієї кімнати. У разі досягнення заданої температури заслінка закривається або зменшує подачу повітря, таким чином запобігаючи зміні заданого значення температури.

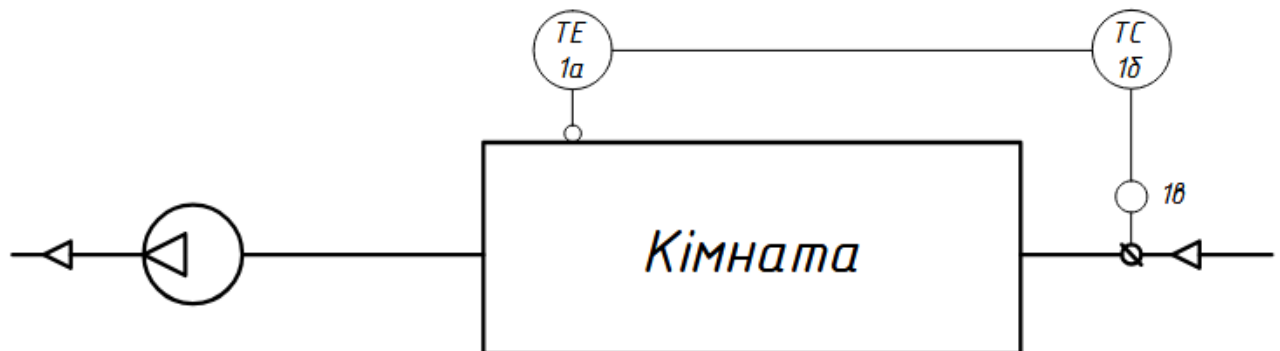


Рис. 1.5 - Регулювання температури повітря в кімнаті

Якщо температура в кімнаті нижча за необхідну, регулятор температури (див. рисунок 1.5, позиція 1б) формує керуючий сигнал на електропривід повітряної заслінки, встановленої у відповідній частині повітропроводу (див. рисунок 1.5, позиція 1в). Заслінка частково або повністю відкривається, дозволяючи подати більшу кількість теплого повітря до цієї кімнати. У разі досягнення заданої температури заслінка закривається або зменшує подачу повітря, таким чином запобігаючи зміні заданого значення температури.

Якщо температура в кімнаті вища за встановлену, заслінка (див. рисунок 1.5, позиція 1в) може повністю закритися, припиняючи подачу повітря в дану кімнату для уникнення ще більшого перевищення значення температури.

Таким чином, зональний контур регулювання температури у приміщеннях є ключовим компонентом сучасних систем повітряного опалення, який забезпечує комфортне опалення для кожної кімнати в будинку.

1.4 Основні характеристики системи повітряного опалення приватного будинку

У рамках реалізації системи повітряного опалення для приватного будинку в проєкті застосовується припливно-витяжна вентиляційна система з рециркуляцією повітря. Дана система побудована на основі модульних повітропроводів прямокутного перерізу, що забезпечує конструктивну гнучкість та можливість інтеграції у вже побудовану будівлю. Це дозволяє одночасно виконувати задачу для подачі свіжого повітря, виведення відпрацьованого, рівномірного розподілення тепла по приміщеннях та забезпечення енергоефективності за рахунок рециркуляції повітря в будівлі.

До складу вентиляційно-опалювальної установки входять такі прилади, як водяний каналний нагрівач Вентс НКВ 400×200-2 та водяний охолоджувач Вентс ОКВ 400×200-3, дані прилади монтуються в повітропроводи. Така схема дозволяє реалізувати не тільки систему опалення, а й можливість охолодження повітря влітку. Монтаж теплообмінників у каналну мережу повітропроводів є типовим рішенням у побутових системах вентиляції тому, що це спрощує обслуговування та забезпечує компактність даних систем.

Канальний нагрівач Вентс НКВ 400×200-2. Зображений на рис. 1.6 прилад використовується для нагрівання повітря у системах вентиляції, кондиціонування та опалення. Він монтується безпосередньо у повітропровід прямокутного перерізу та працює з теплоносієм, в якості якого виступає вода, що має температуру від 60 до 80 °С. Даний нагрівач використовується в побутових та промислових установках, де потрібна компактність, надійність та висока ефективність теплообміну.

Конструкція приладу складається з оцинкованого сталевого корпусу та вбудованого нагрівального блока. Нагрівальний елемент виконаний у вигляді дворядного пакету з мідних трубок, на які насаджені алюмінієві оребрення для підвищення ефективності теплообміну. Трубки впаяні в мідні колектори, через які здійснюється подача та відведення теплоносія. Для підключення до

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		23

гідравлічної системи передбачено різьбові штуцери, розміщені з торцевої частини нагрівача.

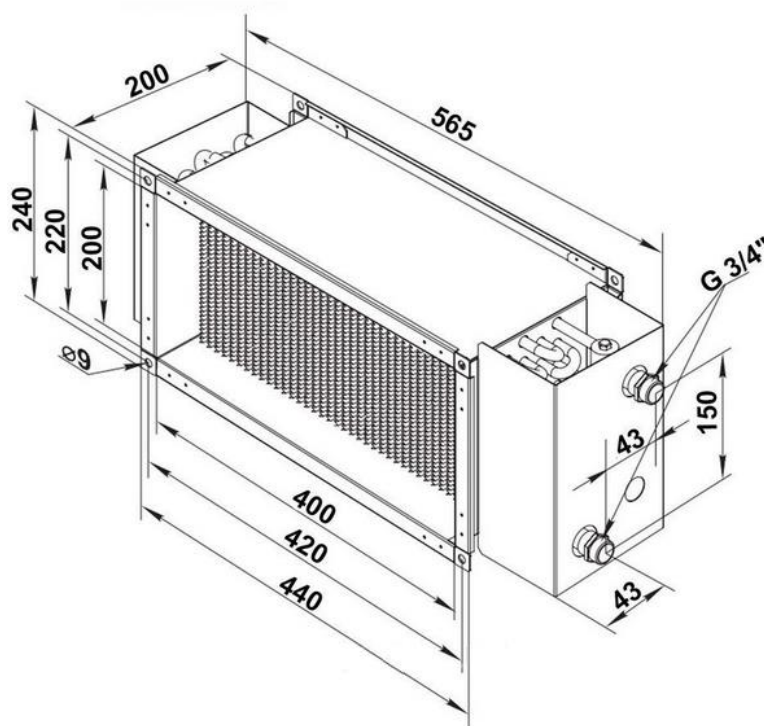


Рис. 1.6 - Канальний нагрівач Вентс НКВ 400×200-2

На вихідному колекторі передбачено різьбовий патрубок G1/4 із заглушкою, що дозволяє встановлювати занурювальний температурний датчик, наприклад, для реалізації функції захисту від замерзання в умовах чергового режиму роботи або аварійної зупинки системи. Такий підхід дозволяє реалізувати захист теплообмінника при критичних температурах теплоносія без участі оператора. Крім того, на торці розміщено повітровипускний клапан (G1/2) для видалення повітря з системи та зливний патрубок (G1/2), що забезпечує зручне технічне обслуговування пристрою, особливо в міжсезонний період.

Процес підігріву повітря здійснюється під час проходження потоку крізь теплообмінник, де повітря контактує з нагрітими мідними трубками та оребренням з алюмінію, яке значно підвищує площу теплообміну. Завдяки компактності конструкції, високій інтенсивності теплопередачі та сумісності з

сучасними системами автоматики, нагрівач забезпечує надійне, стабільне та енергоефективне функціонування в системах побутового та напівпромислового призначення. Усі прилади проходять перевірку на герметичність під тиском до 1,6 МПа за температури теплоносія до 100 °С. Для досягнення максимальної теплоефективності нагрівач рекомендовано підключати за протитоковим принципом.

Технічні характеристики:

- Розмір каналу: 400×200 мм
- Кількість рядів трубок: 2
- Робочий тиск: до 1,6 МПа
- Максимальна температура теплоносія: до 100 °С
- Витрата повітря: 1100 м³/год
- Теплова потужність: від 8,0 до 10,0 кВт
- Витрата води: $\approx 0,10-0,12$ л/с
- Габарити (Д×Ш×В): 565×240×200 мм
- Маса: 7,6 кг

Канальний охолоджувач Вентс ОКВ 400×200-3. Зображений на рис. 1.7 прилад використовується в системах припливної вентиляції для охолодження повітря за допомогою холодної води або водно-гліколевої суміші. Він встановлюється в прямокутний повітропровід і працює у складі вентиляційної установки. Підходить для систем кондиціонування або припливно-витяжної вентиляції з охолодженням.

Корпус охолоджувача виконаний зі сталі, пофарбованої порошковою фарбою; трубні колектори виготовлені з мідних труб; поверхня теплообмінника виготовлена з алюмінієвих пластин. Така комбінація матеріалів забезпечує стійкість до корозії, гарну теплопровідність елементів охолоджувача і довговічність пристрою в умовах експлуатації з водою або водно-гліколевими сумішами. Корпус охолоджувача передбачає розбірну конструкцію, яка забезпечує легкий доступ до теплообмінника та краплєвловлювача для

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		25

очищення та обслуговування при потребі, що є важливою перевагою в умовах тривалої роботи системи в літній період та в цілому.

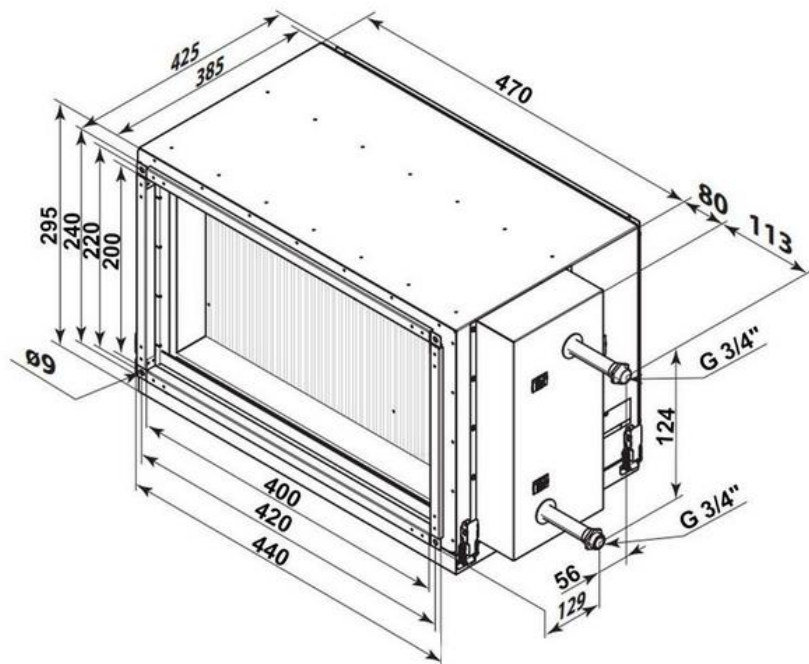


Рис. 1.7 - Канальний охолоджувач Вентс ОКВ 400×200-3

Охолоджувачі виготовляються у 3-рядовому виконанні, що дозволяє досягти більшої площі теплообміну та ефективно знижувати температуру повітря при значних витратах потоку. Внутрішнім робочим середовищем каналного охолоджувача ОКВ є вода або незамерзаюча рідина, що дозволяє експлуатувати систему в умовах змінного температурного режиму без ризику пошкодження обладнання.

Для досягнення максимальної холодопродуктивності охолоджувач необхідно підключити за протитоковим принципом, що дозволяє забезпечити найефективніший теплообмін між повітрям та охолоджувальним середовищем. Враховуючи конструктивні особливості даного пристрою, охолоджувач Вентс ОКВ 400×200-3 добре адаптується до побутових систем з вентиляцією та кондиціонуванням, де можуть висуватися підвищені вимоги до якості повітря, енергоефективності та легкості технічного обслуговування.

Технічні характеристики:

- Розмір каналу: 400×200 мм
- Кількість рядів трубок: 3
- Робочий тиск: до 1,5 МПа
- Робоче середовище: вода або незамерзаюча рідина
- Габарити (Д×Ш×В): 400×200×56 мм
- Маса: 10,4 кг

1.5 Постановка задачі автоматизації для системи повітряного опалення

Основаючись на огляді технологічного процесу, аналізі існуючих систем опалення та систем керування для процесу опалення, в цьому проєкті буде виконуватись підтримка необхідного значення температури повітря в приміщеннях будинку з використанням рециркуляції для забезпечення енергоефективності системи.

Для того, щоб автоматизувати процес опалення приміщень з використанням рециркуляції, потрібно виконати наступні завдання:

- розробити аналітичну модель динамічного режиму температури у приміщенні, отримати на її основі розширену модель ОК, після чого апроксимувати її;
- розрахувати оптимальні параметри налаштування регулятора для підтримки коректної роботи системи повітряного опалення з рециркуляцією;
- розробити АСК та інтерфейс для користувача даної системи в середовищі програмування, яка реалізує керування даною системою;
- запропонувати рекомендації із охорони праці для безпечного монтажу та використання повітряної системи опалення;
- розрахувати економічну ефективність автоматизації системи повітряного опалення з рециркуляцією.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		27

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ПРИМІЩЕННІ

В минулому розділі були проаналізовані системи опалення та методи для регулювання температури повітря в приміщеннях будинку. Основною ідеєю системи, що розглядається, є опалення даних приміщень та підтримка необхідної в них температури за допомогою регулювання потоку нагрітого припливного повітря. Виходячи з цього, головним елементом у даній системі є саме приміщення.

2.1 Розробка аналітичної моделі динамічного режиму температури у приміщенні

Для розрахунку аналітичної моделі динамічного режиму температури необхідно розглянути яким чином змінюється температури в приміщенні з часом, взявши за основу модель із статті [6]. Розглянемо розрахункову схему приміщення, яку зображено на рис. 2.1.

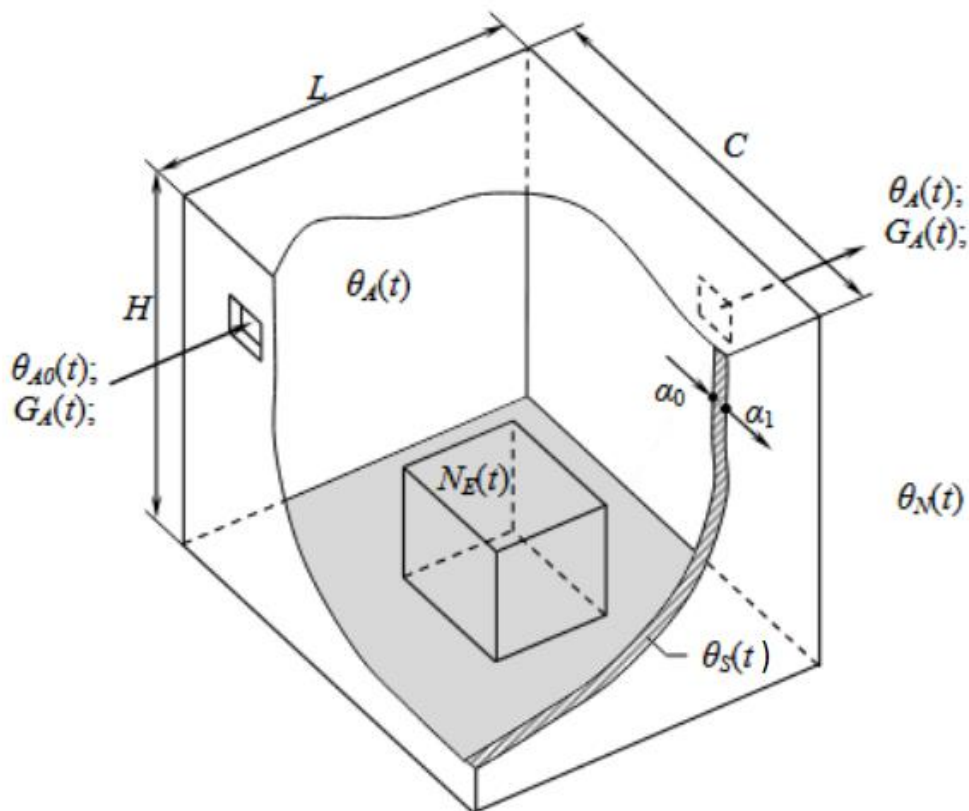


Рис. 2.1 - Розрахункова схема приміщення

До повітряного простору приміщення яке має об'єм $V_A = H \times L \times C$ прибуває підготовлене припливне повітря, температура даного повітря становить $\theta_{A0}(t)$, а витрата $G_A(t)$. Під час процесу теплообміну між технологічним обладнанням (потужність обладнання N_E) та стінами (температура стіни θ_S) у приміщенні температура повітря набуває значення $\theta_A(t)$. Витяжна система забезпечує вивід повітря. Температура навколишнього повітря має значення $\theta_N(t)$.

Під час моделювання було прийнято ряд спрощень. По-перше, у приміщенні не враховуються джерела вологовиділення, оскільки їх наявність залежить від конкретного технологічного процесу, який у межах цього дослідження не розглядається. По-друге, збурення вологості в приміщенні пропонується описувати змінною d_{A0} . Крім того, приведена теплова потужність обладнання $N_E(t)$ включає в себе тепловиділення не лише від устаткування, а й від присутнього персоналу. Модель приміщення побудована у вигляді двох динамічних елементів із зосередженими параметрами: це повітряний об'єм приміщення та стіни. Також під час побудови моделі фізичні характеристики повітряних потоків і поверхонь теплообміну прийняті як усереднені величини в межах робочого діапазону. На основі таких припущень тепловий і матеріальний баланси динамічної системи описуються системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} G_A c_A (\theta_{A0} - \theta_A) - \alpha_0 F_0 (\theta_A - \theta_S) + N_E = c_A M_A \frac{d\theta_A}{dt} \\ \alpha_0 F_0 (\theta_A - \theta_S) - \alpha_1 F_1 (\theta_S - \theta_N) = c_S M_S \frac{d\theta_S}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

тут c_A , c_S - відповідно теплоємність повітря та матеріалу стіни; α_0 , α_1 - відповідно коефіцієнт тепловіддачі всередині приміщення (між повітрям та внутрішньою поверхнею стіни F_0) та ззовні (між зовнішньою поверхнею стіни F_1 та навколишнім повітрям, що має температуру θ_S); M_A - маса повітря; M_S - загальна маса матеріалу стін.

Рівняння (2.1) описує тепловий баланс для повітряного простору та теплоізолюючої стіни приміщення.

Після групування подібних та лінеаризації (2.1) маємо:

						Т А - 1 1 3 9 4 . 0 0 1 4 . 0 0 1 . А Т Х . П	Арк .
Зм .	Кільк .	Арк .	№ док .	П і д н .	Дата		2 9

$$\begin{cases} T_A \frac{d\Delta\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_0 \Delta\theta_{AO} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta\theta_S + k_3 \Delta N_E \\ T_S \frac{d\Delta\theta_S}{dt} + \Delta\theta_S = k_4 \Delta\theta_A + k_5 \Delta\theta_N \end{cases} \quad (2.2)$$

де $K_A = c_A G_A + \alpha_0 F_0$; $K_S = \alpha_0 F_0 + \alpha_1 F_1$; $T_A = \frac{c_A M_A}{K_A}$; $T_S = \frac{c_S M_S}{K_S}$; $k_0 = \frac{c_A G_A}{K_A}$; $k_1 = \frac{\theta_{A0} - \theta_A}{K_A}$; $k_2 = \frac{\alpha_0 F_0}{K_A}$; $k_3 = \frac{1}{K_A}$; $k_4 = \frac{\alpha_0 F_0}{K_S}$; $k_5 = 1 - k_4$.

Розглянемо систему (2.2) в області Лапласа.

$$\begin{cases} \Delta\theta_A (T_A p + 1) = k_0 \Delta\theta_{A0} + k_1 \Delta G_A + k_2 \Delta\theta_S + k_3 \Delta N \\ \Delta\theta_S (T_S p + 1) = k_4 \Delta\theta_A + k_5 \Delta\theta_N \end{cases} \quad (2.3)$$

Із (2.2) знаходимо $\Delta\theta_A$, враховуючи (2.3). Після групування подібних отримаємо:

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} [(b_1 p + b_0) \Delta\theta_{A0} + (b_3 p + b_2) \Delta G_A + (b_5 p + b_4) \Delta N_E + b_6 \Delta\theta_N], \quad (2.4)$$

тут $a_1 = \frac{T_A + T_S}{1 - k_2 k_4}$; $a_2 = \frac{T_A T_S}{1 - k_2 k_4}$; $b_0 = \frac{k_0}{1 - k_2 k_4}$; $b_1 = \frac{k_0 T_S}{1 - k_2 k_4}$; $b_2 = \frac{k_1}{1 - k_2 k_4}$; $b_3 = \frac{k_1 T_S}{1 - k_2 k_4}$; $b_4 = \frac{k_3}{1 - k_2 k_4}$; $b_5 = \frac{k_3 T_S}{1 - k_2 k_4}$; $b_6 = \frac{k_2 k_5}{1 - k_2 k_4}$.

З рівняння (2.4) отримаємо передаточну функцію приміщення за каналом регулювання, тобто зміна витрати припливного повітря:

$$W_p = \frac{b_3 p + b_2}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (2.5)$$

З рівняння (2.4) отримаємо передаточну функцію приміщення за каналом збурення, тобто зміна температури всередині приміщення:

$$W_3 = \frac{b_5 p + b_4}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (2.6)$$

2.2 Дослідження перехідних процесів температури у приміщенні

Отримавши передаточну функцію приміщення за каналом регулювання та збурення. За допомогою динамічної моделі виконаємо моделювання перехідних процесів приміщення. У таблиці 2.1 наведені параметри для приміщення.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		30

Таблиця 2.1 Параметри для приміщення

№	Назва параметру	Позначення	Числове позначення	Розмірність
1	Габарити приміщення	$H \times L \times C$	$4 \times 5 \times 3$	м
2	Густина повітря	ρ_A	1.2	кг/м ³
3	Об'єм повітряного простору у приміщенні	V_A	60	м ³
4	Витрата повітря у приміщенні	G_A	0.306	кг/сек
5	Теплоємність повітря	c_A	1010	Дж/(кг°С)
6	Маса повітря у приміщенні	M_A	72	кг
7	Площа теплообміну внутрішньої поверхні стіни	F_0	94	м ²
8	Коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні стіни	α_0	8.7	Вт/(м ² °С)
9	Густина цегляної стінки	ρ_S	1750	кг/м ³
10	Теплоємність цегляної стінки	c_S	920	Дж/(кг°С)
11	Маса цегляної стінки	M_S	35910	кг
12	Площа теплообміну зовнішньої поверхні стіни	F_1	54	м ²
13	Коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні стіни	α_1	23	Вт/(м ² °С)
14	Вхідна температура повітря	θ_{A0}	30	°С
15	Вихідна температура повітря	θ_A	25	°С

Створимо m-файл у Matlab та внесемо інформацію з таблиці для подальшого отримання числових значень змінних для передаточних функцій приміщення за каналами регулювання та збурення, код файлу наведено нижче.

```

1      pa=1.2;
2      Va=60;
3      Ga=0.306;
4      ca=1010;
5      Ma=72;
6      F0=94;
7      al0=8.7;
8      ps=1750;
9      cs=920;
10     Ms=35910;
11     F1=54;
12     al1=23;
13     Oao=30;
14     Oa=25;
15     Ka=((ca*Ga)+(al0*F0));
16     Ks=((al0*F0)+(al1*F1));
17     Ta=((ca*Ma)/Ka);
18     Ts=((cs*Ms)/Ks);
19     k0=((ca*Ga)/Ka);
20     k1=((Oao-Oa)/Ka);
21     k2=((al0*F0)/Ka);
22     k3=1/Ka;
23     k4=((al0*F0)/Ks);
24     k5=1-k4;
25     a1=((Ta+Ts)/(1-k2*k4));
26     a2=((Ta*Ts)/(1-k2*k4));
27     b0=((k0)/(1-k2*k4));
28     b1=((k0*Ts)/(1-k2*k4));
29     b2=((k1)/(1-k2*k4));
30     b3=((k1*Ts)/(1-k2*k4));
31     b4=((k3)/(1-k2*k4));
32     b5=((k3*Ts)/(1-k2*k4));
33     b6=((k2*k5)/(1-k2*k4));
34

```

Після розрахунку були отримані такі значення:

$$a_1 = 22621.7245 ;$$

$$a_2 = 1454004.4385 ;$$

$$b_0 = 0.3852 ;$$

$$b_1 = 6179.5188 ;$$

$$b_2 = 0.0062 ;$$

$$b_3 = 99.9728 ;$$

$$b_4 = 0.0012 ;$$

$$b_5 = 19.9945 ;$$

$$b_6 = 0.6147 .$$

Підставимо отримані результати роботи програми до передаточних функцій приміщення (2.5) та (2.6), після чого для передатної функції (2.8) перейдемо із величини Вт у КВт, а ще переведемо масштаб часу із секунд в хвилини для двох передатних функцій (2.7) та (2.8).

За каналом регулювання, тобто зміни витрати припливного повітря:

$$W_p = \frac{1.6s+0.37}{403.9s^2+377s+1} \quad (2.7)$$

За каналом збурення, тобто зміна температури всередині приміщення:

$$W_z = \frac{0.3s+1.2}{403.9s^2+377s+1} \quad (2.8)$$

Побудуємо у Simulink моделі за каналами регулювання та збурення показані відповідно на рис. 2.2 та рис. 2.3.

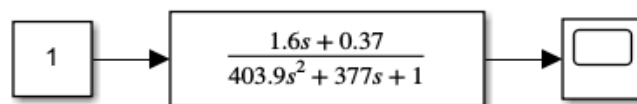


Рис. 2.2 - Схема в Simulink за каналом регулювання

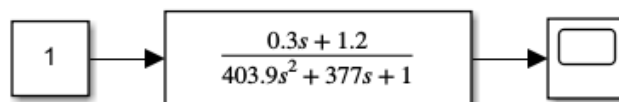


Рис. 2.3 - Схема в Simulink за каналом збурення

Згідно побудованих моделей, тепер отримаємо перехідні характеристики за каналами регулювання зображено на рис. 2.4 та збурення зображено на рис. 2.5.

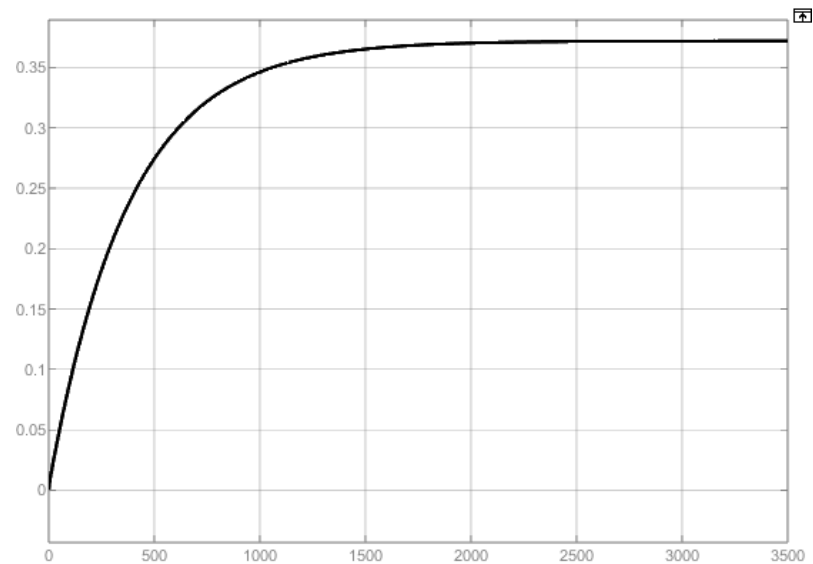


Рис. 2.4 - Перехідна характеристика отриманої моделі за каналом регулювання

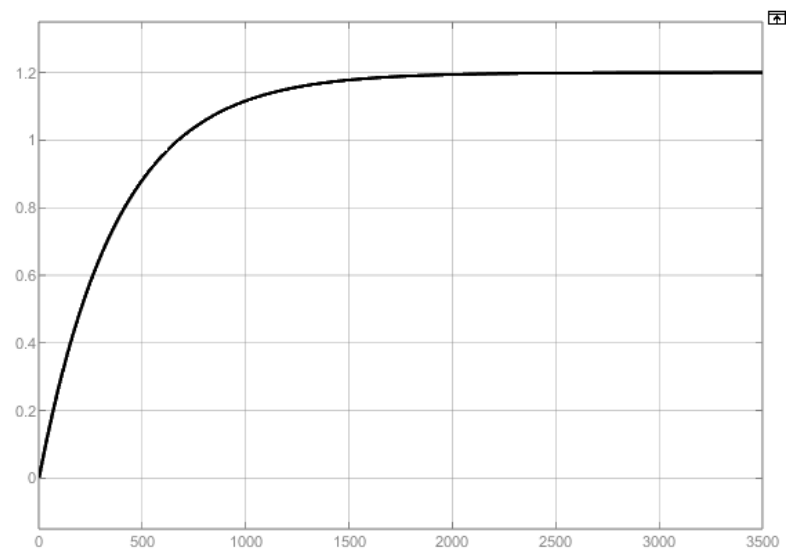


Рис. 2.5 - Перехідна характеристика отриманої моделі за каналом збурення

2.3 Моделювання перехідних характеристик для розширеного ОК

У минулих пунктах було зроблено аналітичну модель ОК. Для того щоб побудувати більш реалістичну модель, а саме розширений ОК за каналом регулювання, потрібно врахувати ще ВМ, датчик та транспортне запізнення, впливаючі на динамічний процес.

Виконавчий механізм

У системі використовується ВМ Belimo LM230ASR-TP, що керує положенням повітряної заслінки для регулювання потоку нагрітого повітря до кімнати. За технічним паспортом приладу час ходу становить 150 секунд для кута обертання в 95 градусів. Оскільки ВМ керується за допомогою аналогового сигналу, можна представити її в якості аперіодичної ланки 1-го порядку. Сталою часу оберемо значення 35 секунд, що відповідає ~25% робочого ходу в реальних умовах:

$$W_{\text{ВМ}}(s) = \frac{1}{35s + 1} \quad (2.9)$$

Датчик температури

Температура в кімнаті вимірюється за допомогою датчика Belimo 22RT-19-1. Для даного датчику характерна мала інерційність. Представимо датчик у вигляді ще однієї аперіодичної ланки 1-го порядку. Стала часу вимірювання температури, якщо врахувати ще й час на перетворення сигналу та обробку його за допомогою ПЛК, оберемо значення в 3 секунди:

$$W_{\text{Д}}(s) = \frac{1}{3s + 1} \quad (2.10)$$

Транспортне запізнення

Також враховуючи те, що повітря в системі за допомогою прокладених повітропроводів приходить з певною затримкою, необхідно додати також й ланку транспортного запізнення. Прийmemo відстань від калорифера до кімнати у 10 метрів, поперечний переріз повітропроводу виходячи з розміру калорифера становить 0.08 м^2 , витрата повітря згідно паспорту становить $0.3056 \text{ м}^3/\text{с}$ тоді швидкість повітря в повітропроводі буде $v = \frac{0.3056}{0.08} = 3.82 \text{ м/с}$, виходячи з цього, маємо:

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		35

$$\tau = \frac{10}{3.82} = 2.61 \text{ с} \quad (2.11)$$

Побудова розширеного ОК за каналом регулювання

Використовуючи модель отриману з минулих пунктів та ланок отриманих в даному пункті, створимо розширену модель ОК за каналом регулювання (рис. 2.6) у середовищі Simulink.

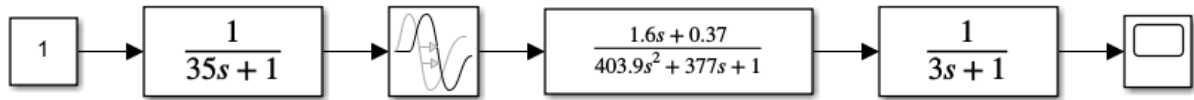


Рис. 2.6 - Схема в Simulink розширеної моделі ОК за каналом регулювання

Побудувавши схему розширеної моделі ОК за каналом регулювання, тепер можемо зняти її перехідну характеристику рис. 2.7 та подивитись на різницю із знятою раніше (рис. 2.4).

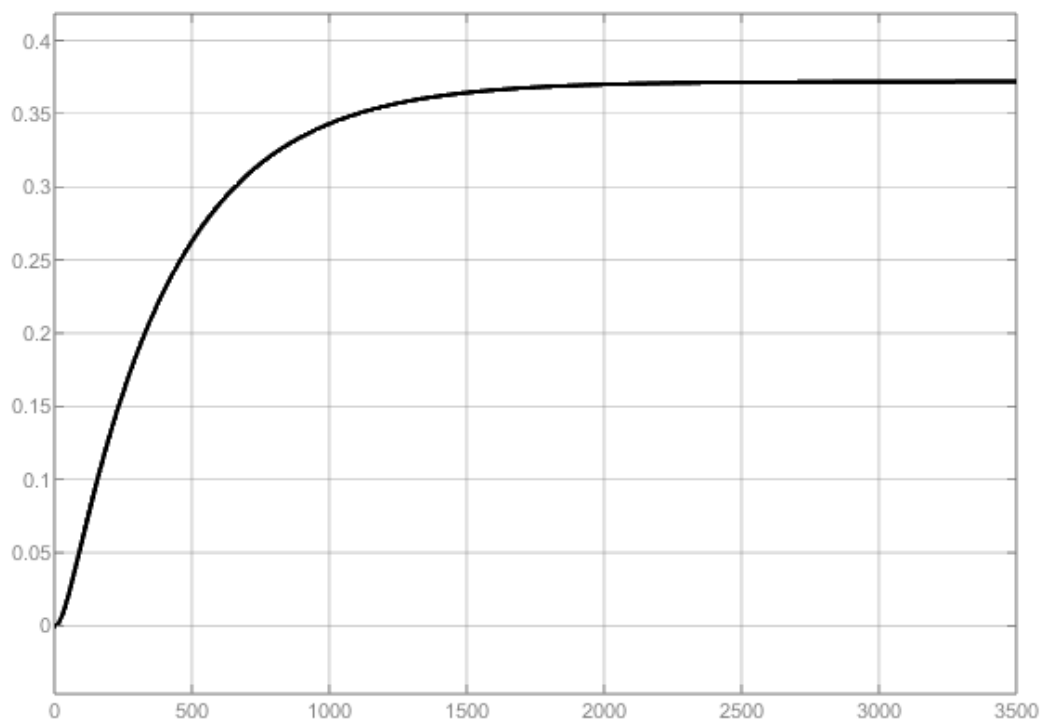


Рис. 2.7 - Перехідна характеристика розширеної моделі ОК за каналом регулювання

2.4 Апроксимація розширеного ОК спрощеною математичною моделлю

Після створення моделі розширеного ОК за каналом регулювання, з'являється задача спрощення даної моделі, що є необхідним для зручності в подальшому розрахунку регулятора, також спростимо модель ОК за каналом регулювання.

При розгляді перехідної характеристики розширеного ОК за каналом регулювання створеної у середовищі Simulink, отриманий графік наближається до аперіодичної ланки першого порядку з транспортним запізненням, те ж саме стосується перехідної характеристики за каналом збурення. Виходячи з цього ми апроксимуємо наявну складну модель передатною функцією типу:

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-\tau p} \quad (2.12)$$

де K - коефіцієнт передачі, T - стала часу, τ - транспортне запізнення.

Апроксимація передаточних функцій

Виконаємо апроксимацію методом модифікованого методу логарифмування. Даний метод можна побачити на рис. 2.8.

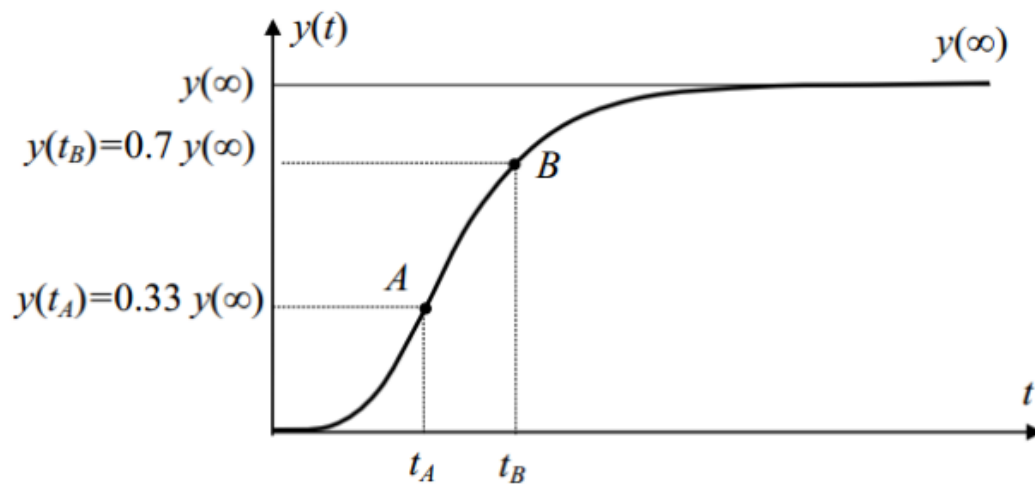


Рис. 2.8 - Графічне відображення модифікованого методу логарифмування

В даному методі обирається дві точки A та B, які встановлюються на 33% та 70% від кінцевого значення перехідної характеристики.

Для розрахунку сталої часу T та транспортного запізнення τ , використовуються такі формули:

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		37

$$T = 1.25(t_B - t_A) \quad (2.13)$$

$$\tau = 0.5(3t_A - t_B) \quad (2.14)$$

Коефіцієнт передачі розраховується як $K = y(\infty)$.

Розрахуємо розширений ОК за каналом регулювання (рис. 2.7) та збурення (рис. 2.5), отримуємо значення t_A та t_B , після чого підставляємо їх у формули (2.13) та (2.14), також визначимо параметр K .

За каналом регулювання:

$$t_A = 189.1$$

$$t_B = 491.5$$

$$T = 1.25(491.5 - 189.1) = 378$$

$$\tau = 0.5(567.3 - 491.5) = 37.9$$

$$K = 0.37$$

За каналом збурення:

$$t_A = 151.4$$

$$t_B = 453.4$$

$$T = 1.25(453.4 - 151.4) = 377.5$$

$$\tau = 0.5(454.2 - 453.4) = 0.4$$

$$K = 1.2$$

Підставивши отримані значення у формулу (2.12), отримаємо апроксимовану функцію розширеного ОК за каналом регулювання та ОК за каналом збурення.

За каналом регулювання:

$$W(p) = \frac{0.37}{378p + 1} e^{-37.9p} \quad (2.15)$$

За каналом збурення:

$$W(p) = \frac{1.2}{377.5p + 1} e^{-0.4p} \quad (2.16)$$

Побудуємо апроксимовану функцію розширеного ОК за каналом регулювання (рис. 2.9) та ОК за каналом збурення (рис. 2.10) в середовищі Simulink.

За каналом регулювання:

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		38

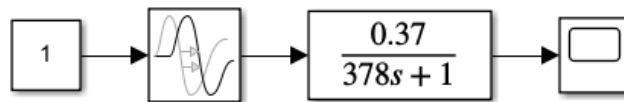


Рис. 2.9 - Схема апроксимованої функції розширеної ОК в Simulink за каналом регулювання

За каналом збурення:



Рис. 2.10 - Схема апроксимованої функції ОК в Simulink за каналом збурення

Знімемо перехідну характеристику з отриманої апроксимованої функції розширеного ОК за каналом регулювання (рис. 2.11) та ОК за каналом збурення (рис. 2.12).

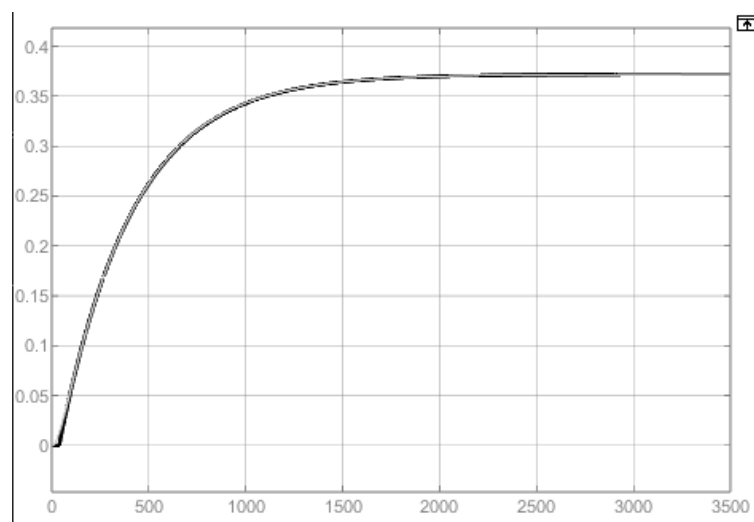


Рис. 2.11 - Перехідна характеристика апроксимованої функції розширеного ОК за каналом регулювання

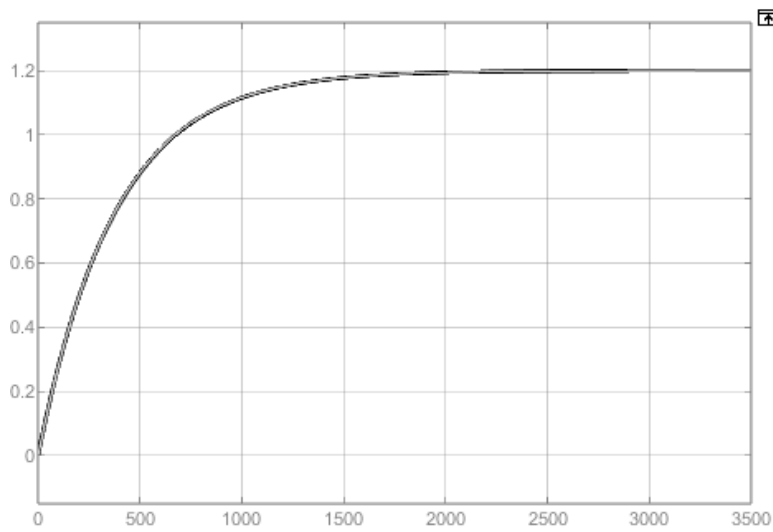


Рис. 2.12 - Перехідна характеристика апроксимованої функції ОК за каналом збурення

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ОПАЛЕННЯ В ПРИМІЩЕННІ

3.1 Структурна схема АСР температури у приміщенні

В даному проєкті буде реалізоване регулювання за допомогою одноконтурної системи керування. Одноконтурна система керування надає стабільність та надійність роботи системи, при цьому залишаючись доволі простою у реалізації. Вона дозволяє точно регулювати температуру в межах окремого приміщення, незалежно від впливу інших контурів чи зон. Така простота в реалізації в сумі з ефективністю та точністю роблять одноконтурну систему керування кращим вибором для задач регулювання зонального регулювання температури в будинку.

Дана система побудована за класичною схемою, яка складається з регулятора, виконавчого механізму, об'єкта керування та вимірювального елемента. Побачити структурну схему такої одноконтурної АСР можна на рис. 3.1, де X - вхідний сигнал, Z - збурення, Y - вихідний сигнал, N_p - передавальна функція об'єкту по каналу "завдання-вихід", N_z - передавальна функція об'єкту по каналу "збурення-вихід". В якості збурення виступає поглинання тепла

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П		Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата			40

повітря стінами будинку. Тоді дану систему можна розглядати за двома каналами: ХУ - “завдання-вихід” та ZУ - “збурення-вихід”.

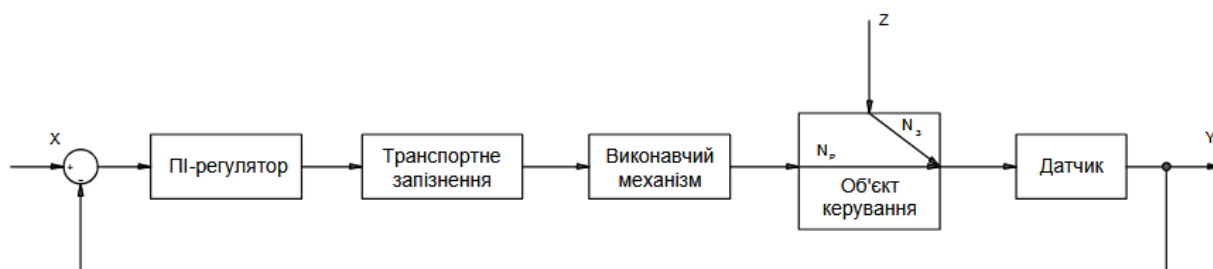


Рис. 3.1 - Структурна схема одноконтурної АСР розширеного ОК

Об’єктом керування в даній системі є повітряний об’єм кімнати. Даний об’єкт був отриманий в минулому розділі за допомогою аналітичного моделювання (2.7, 2.8), після чого він був апроксимований за каналом “завдання-вихід” для зручності розрахунків регулятора (2.15). Оскільки в системі окрім об’єкта керування представленого в якості аперіодичної ланки першого порядку з запізненням, присутні ще й транспортне запізнення, ВМ та датчик, тому даний об’єкт є розширеним ОК. Виконавчий механізм, датчик температури та транспортне запізнення повітря в системі були також розраховані у минулому розділі (2.9, 2.10, 2.11).

В даній системі для автоматичного керування було обрано ПІ-регулятор, як найбільш доцільний. Даний регулятор забезпечує швидке реагування на зміну вхідного сигналу за допомогою пропорційної дії та усуває статичну похибку за допомогою інтегральної складової. Такий регулятор є гарним рішенням для використання в даній системі за рахунок його простоти, стабільності роботи за умов повільної динаміки та відсутності схильностей до перерегулювання.

Правильний вибір метода розрахунку регулятора є одним з ключових факторів, що впливають на ефективність роботи АСР. У системах опалення особливе значення має здатність системи швидко та точно реагувати на вплив збурень на систему та зміну заданого значення. Поганий вибір методу розрахунку регулятора може призвести до тривалого перехідного процесу та

надмірних перерегулювань. За умов системи повітряного опалення це буде дискомфортом для мешканців будинку та надмірним використанням енергії.

Для розрахунку регулятора будуть використовуватися методи, що враховують запізнення та динамічні характеристики системи. Для даної системи в цьому розділі розрахуємо ПІ-регулятор за такими двома методами: метод 20% перерегулювання та метод РАФХ.

Метод 20% перерегулювання дозволяє отримати достатньо швидкий перехідний процес з невеликим перевищенням заданого значення, забезпечуючи як швидкодію системи, так і її стійкість, тому даний метод є доцільним для подібних систем, що мають помірну інерційність.

Метод РАФХ дозволяє отримати більш швидкий перехідний процес, але може бути більш чутливим до зміни параметрів об'єкта.

3.2 Розрахунок АСР температури в приміщенні методом 20%

Розрахуємо параметри ПІ-регулятора за методом 20% перерегулювання. Даний метод орієнтується на отриманні доволі швидкого перехідного процесу з обмеженням перевищення встановленого значення температури, що є ефективним для подібних систем опалення, в яких такі параметри забезпечують комфортне використання системи мешканцями будинку. Такий метод часто використовують для об'єктів які мають помірну інерційність та запізнення, саме таким об'єктом є повітряна система опалення. За допомогою отримання середнього варіанту між швидкодією та стабільністю системи, такий підхід дозволяє реалізувати енергоефективне та надійне керування.

Розрахуємо ПІ-регулятор за методом 20% перерегулювання, маючи такі параметри ОК отриманого з минулого розділу ($K = 0.37$, $T = 378$, $\tau = 37.9$):

$$K_p = \frac{0.7}{K} * \frac{T}{\tau} = \frac{0.7}{0.37} * \frac{378}{37.9} = 18.9 \frac{B}{^{\circ}C}$$

$$T_i = 0.7 * T = 0.7 * 378 = 264.6 \text{ c}$$

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		42

Отримавши параметри для ПІ-регулятора, побудуємо модель одноконтурної системи керування для розширеного ОК згідно структурної схеми на (рис. 3.1) у середовищі Simulink, дана модель наведена на рис. 3.2.

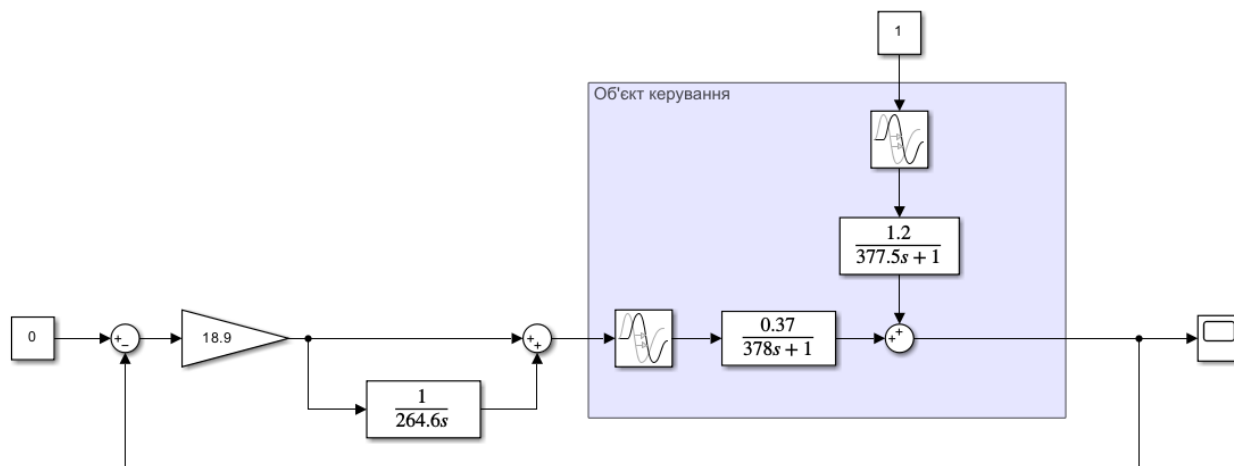


Рис. 3.2 - Одноконтурна система керування розширеним ОК в Simulink

Після того, як було побудовано модель одноконтурної системи керування розширеним ОК в Simulink, знімемо перехідні процеси за каналами “завдання-вихід” та “збурення-вихід” зображені на рис. 3.3 та рис. 3.4.

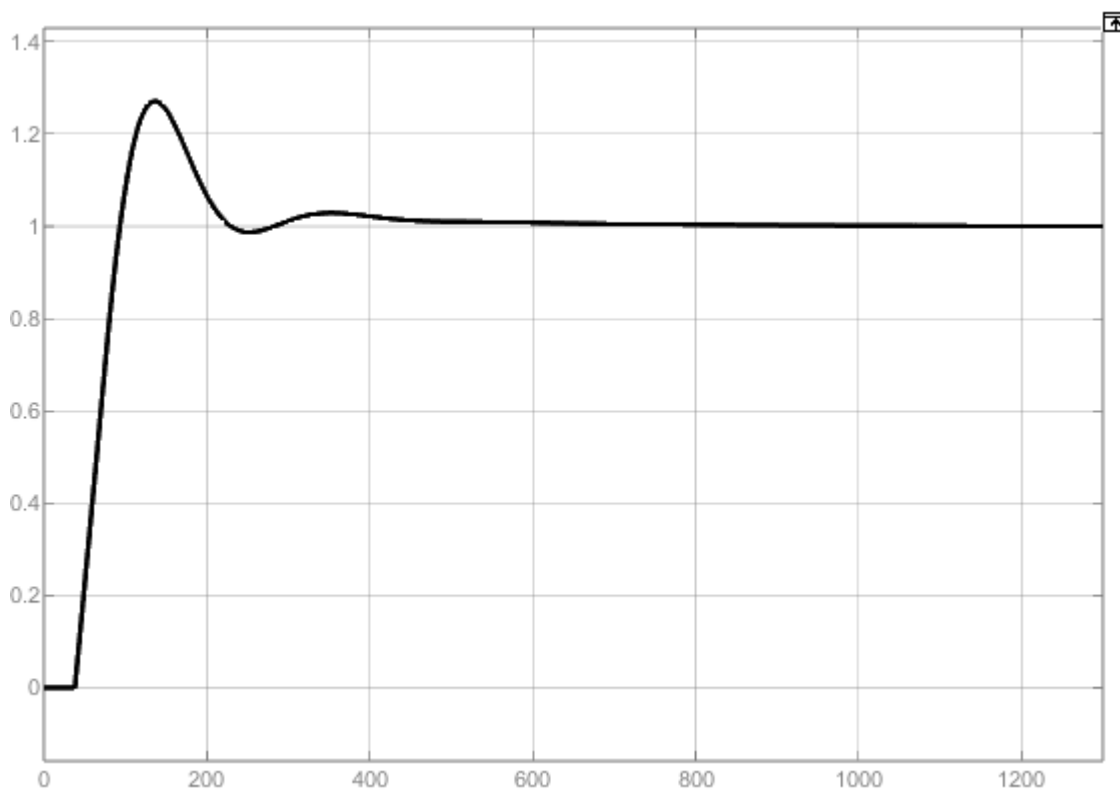


Рис. 3.3 - Перехідний процес за каналом “завдання-вихід”

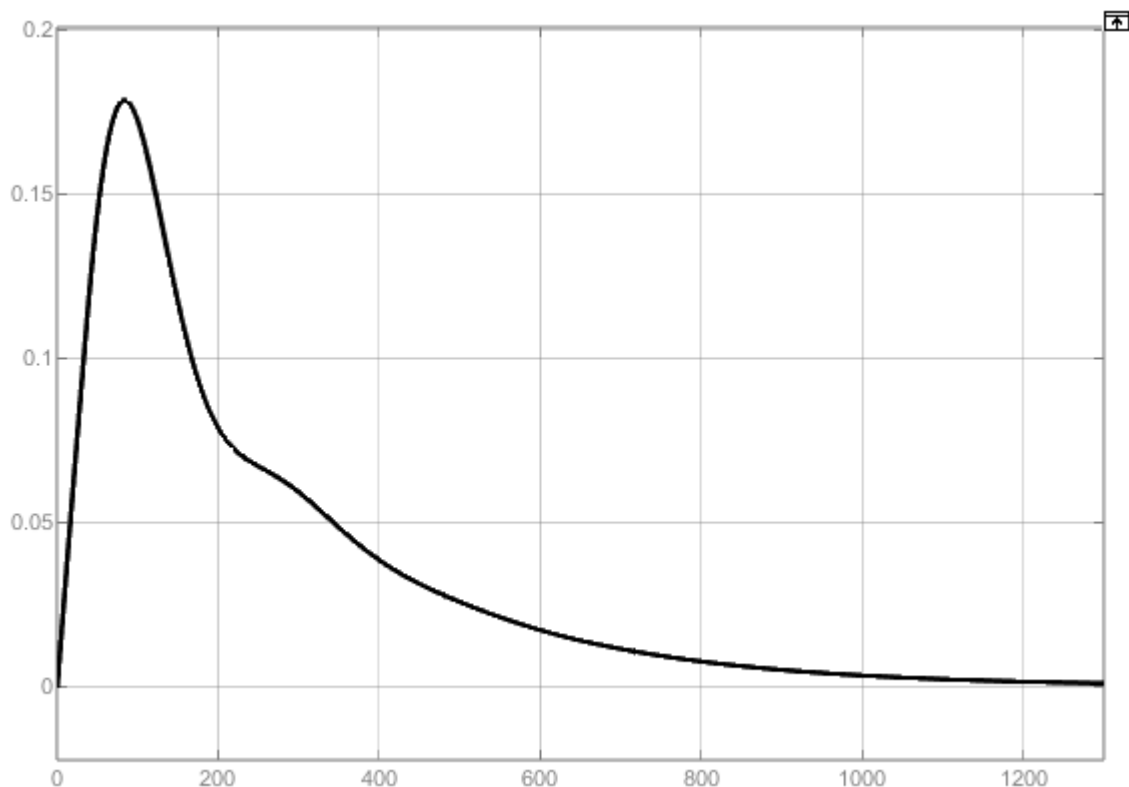


Рис. 3.4 - Перехідний процес за каналом “збурення-вихід”

3.3 Розрахунок АСР температури у приміщенні методом РАФХ

Розрахуємо параметри ПІ-регулятора за методом РАФХ. Даний метод дозволяє досягти покращення динаміки системи регулювання за допомогою узгодження частотних характеристик об’єкта та регулятора. Такий метод часто використовують коли потрібно забезпечити високу швидкодію та точність системи при збереженні її стійкості. Беручи до уваги інерційні властивості повітряного об’єму приміщення та наявність у системі запізнення, можна сказати, що використання даного методу дозволить отримати такі параметри для регулятора, що забезпечують ефективну роботу АСР при змінних умовах під час експлуатації.

Розрахуємо ПІ-регулятор методом РАФХ. Для цього виберемо перехідний процес із 20% перерегулюванням, якому відповідає $\psi = 0.9$, $m = 0.385$. Використаємо формули для визначення параметрів ПІ-регулятора та побудови кривої заданого ступеня коливальності.

$$\begin{cases} K_p = -\frac{P_{OK}(m, \omega) + Q_{OK}(m, \omega)m}{(A_{OK}(m, \omega))^2} \\ K_i = -\frac{\omega(m^2+1) \cdot Q_{OK}(m, \omega)}{(A_{OK}(m, \omega))^2} \end{cases} \quad (3.1)$$

Створимо m-файл у Matlab для побудови кривої розгону заданого степеня коливальності:

```

1      m=0.385;
2      w=0:0.00001:0.034;
3      p=w.*(j-m);
4      Wok=(0.37.*exp(-37.9.*p))./(378.*p+1);
5      Re=real(Wok);
6      Im=imag(Wok);
7      Kp=-(m.*Im+Re)./(Im.^2+Re.^2);
8      Ki=-w.*(m.^2+1).*Im./(Im.^2+Re.^2);
9      plot(Kp,Ki);
10     ylabel('Ki');
11     xlabel('Kp');
12     grid on;

```

Після компіляції даного коду була отримана крива розгону, яка показана на рис. 3.5, заданого степеня по якій отримаємо параметри для ПІ-регулятора.

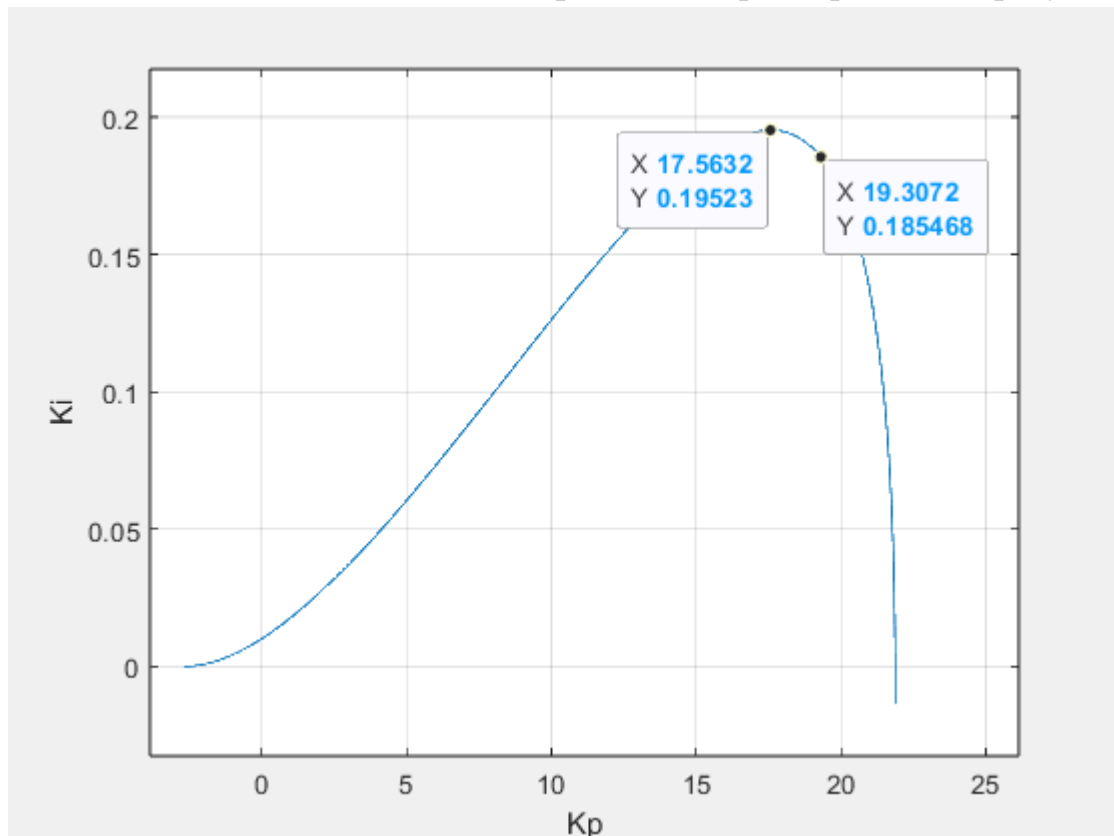


Рис. 3.5 - Крива розгону заданого степеня коливальності з позначеними точками $K_i \max$ та $0.95K_i \max$

Згідно отриманої кривої розгону заданого степеня коливальності, яка зображена на (рис. 3.5), отримаємо параметри налаштування ПІ-регулятора:

$$K_p = 19.3$$

$$K_i = 0.1855468$$

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} = \frac{19.3}{0.1855468} = 104$$

Отримавши параметри для ПІ-регулятора за допомогою даного методу, тепер можна перевірити правильність розрахунків побудувавши годографи АФХ та РАФХ розімкнутої системи. Для того, щоб перевірити та побудувати дані годографи необхідно створити новий m-файл у середовищі Matlab, код даного файлу наведений нижче.

```

1      w=0:0.007:0.13;
2      m=0.385;
3      p=w.*(-m+1j);
4      Wok=(0.37.*exp(-37.9.*p))./(378.*p+1);
5      Wr=19.3.*(1+1./(104.*p));
6      W=Wr.*Wok;
7      Re=real(W);
8      Im=imag(W);
9      plot(Re,Im)
10     grid on
11     hold on
12     p1=w.*1j;
13     Wok1=(0.37.*exp(-37.9.*p1))./(378.*p1+1);
14     W1=Wr.*Wok1;
15     Re=real(W1);
16     Im=imag(W1);
17     plot(Re,Im)
18     xlabel('Re')
19     ylabel('Im')
20     plot(-1,0, 'ko')
21     legend("РАФХ", "АФХ");

```

Після компіляції коду, отримали годографи АФХ та РАФХ розімкнутої системи зображені на рис. 3.6.

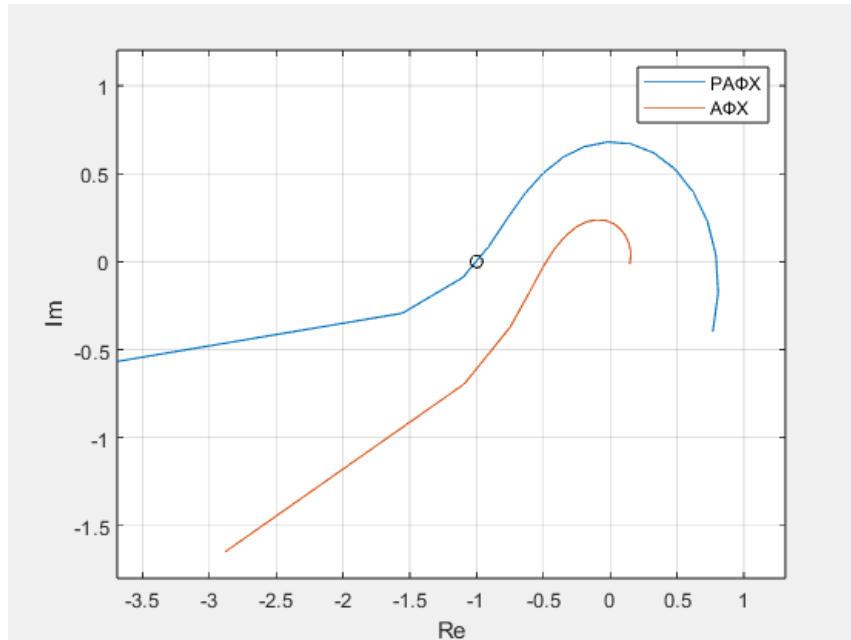


Рис. 3.6 - Годографи АФХ та РАФХ розімкнутої системи

Дивлячись на отримані годографи АФХ та РАФХ на (рис. 3.6) можна побачити, що РАФХ розімкнутої системи проходить через точку $(-1, j0)$. Тоді отримана система має показник коливання $m = 0.385$. Виходячи з отриманих результатів отримуємо висновок, що розрахунок ПІ-регулятора за методом РАФХ є вірним.

Отримавши параметри для ПІ-регулятора та переконавшись у їх вірності, побудуємо модель одноконтурної системи керування для розширеного ОК згідно структурної схеми на (рис. 3.1) у середовищі Simulink, створена модель показана на рис. 3.7.

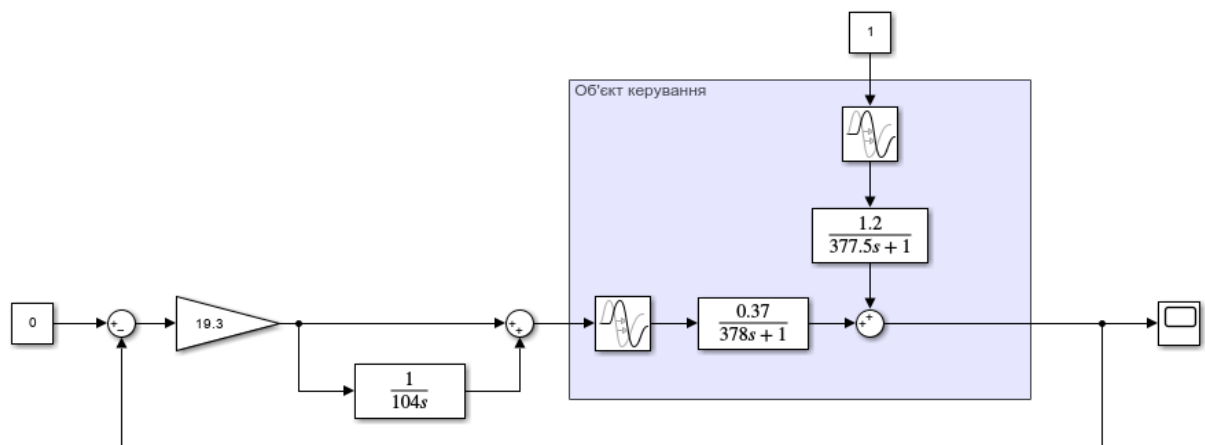


Рис. 3.7 - Одноконтурна система керування розширеним ОК в Simulink

Після того, як було побудовано модель одноконтурної системи керування розширеним ОК в Simulink, знімемо перехідні процеси за каналами “завдання-вихід” та “збурення-вихід” зображені відповідно на рис. 3.8 та рис. 3.9.

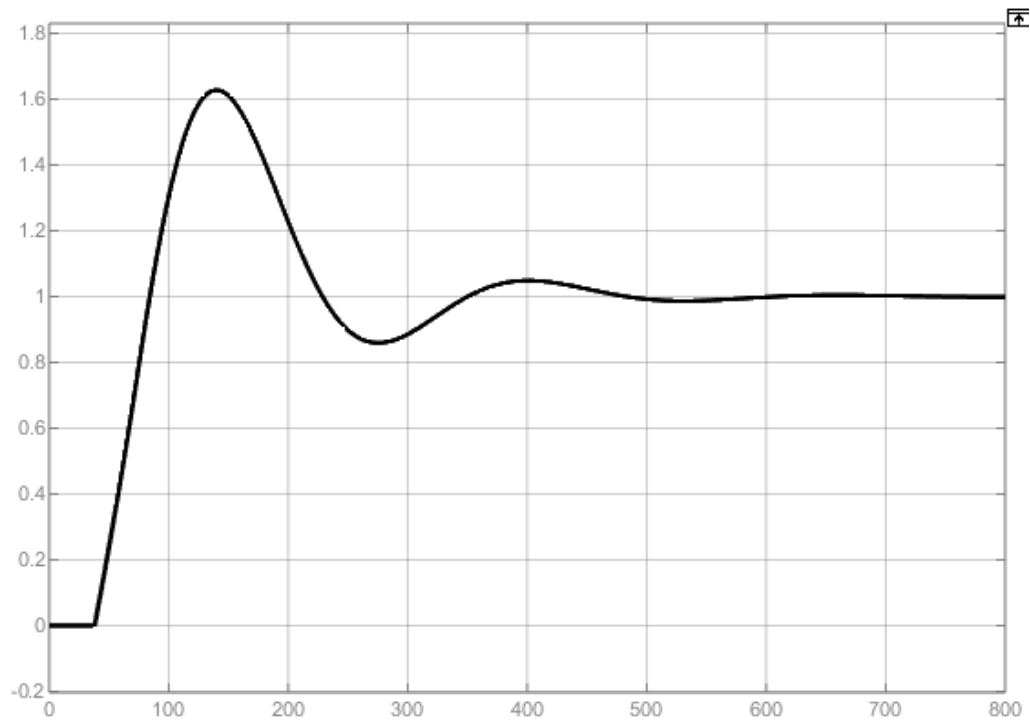


Рис. 3.8 - Перехідний процес за каналом “завдання-вихід”

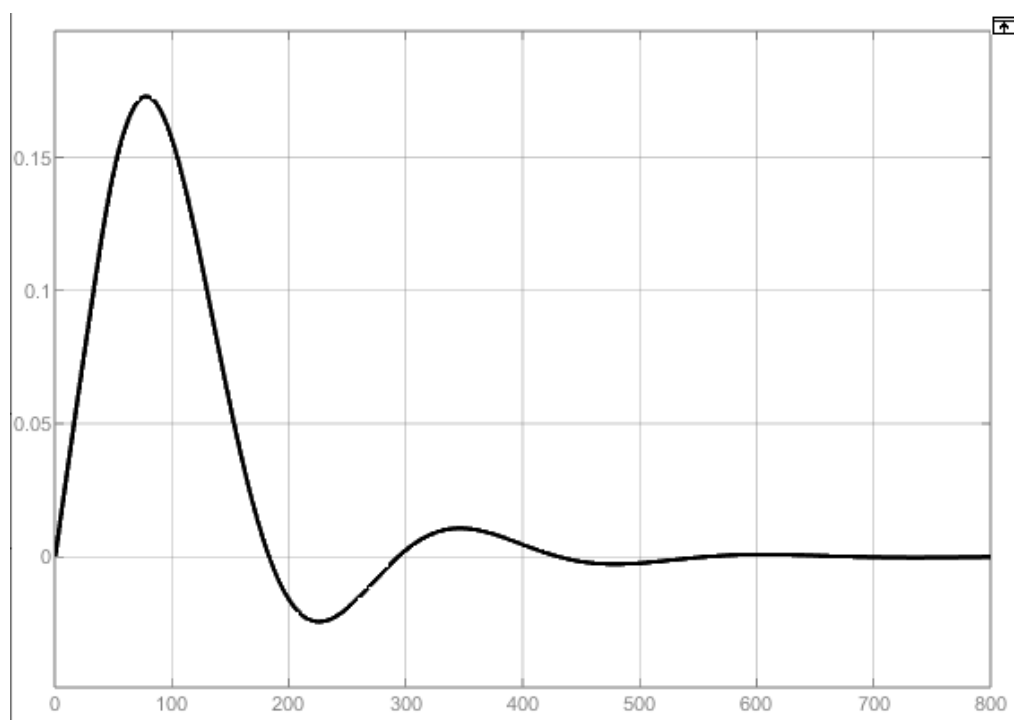


Рис. 3.9 - Перехідний процес за каналом “збурення-вихід”

3.4 Аналіз отриманих результатів

Виконаємо аналіз ефективності роботи автоматичних систем регулювання температури у приміщенні з використанням ПІ-регуляторів, які були налаштовані за двома різними методами, а саме: методом 20% перерегулювання та методом РАФХ. Метою аналізу є порівняння динамічних властивостей систем та вибір регулятора, який має кращі показники порівняно з іншим відносно розробляємої системи повітряного опалення.

Порівняння буде виконуватись прямими показниками якості перехідних процесів: статичною похибкою, динамічною похибкою, показником перерегулювання, степінь затухання та часом перехідного процесу. Дані критерії будуть порівнюватись, як за каналом “завдання-вихід”, так і за каналом “збурення-вихід”. На основі отриманих результатів буде зроблено вибір методу та регулятора, який надає кращі показники для поставленої задачі автоматизації.

Для початку за допомогою створення моделі у середовищі Simulink порівняємо отримані перехідні характеристики візуально, розроблена модель показана на рис. 3.10.

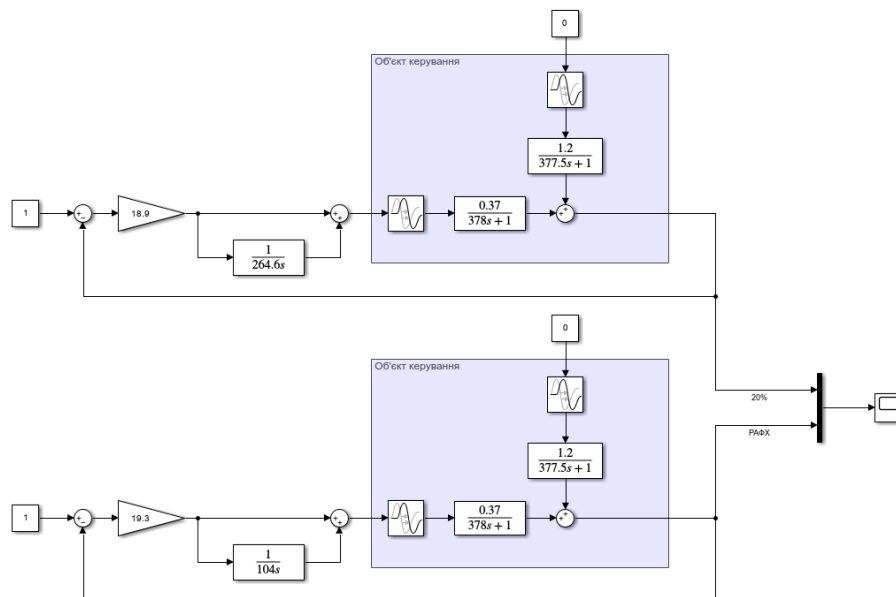


Рис. 3.10 - Модель для порівняння перехідних характеристик розроблених одноконтурних систем керування розширеним ОК з ПІ-регуляторами

Тепер побудувавши модель для порівняння двох методів розрахунку ПІ-регуляторів, можемо зняти їх перехідні характеристики за каналом “завдання-вихід” для розрахунку їх критеріїв якості, побачити перехідний процес можна на рис. 3.11.

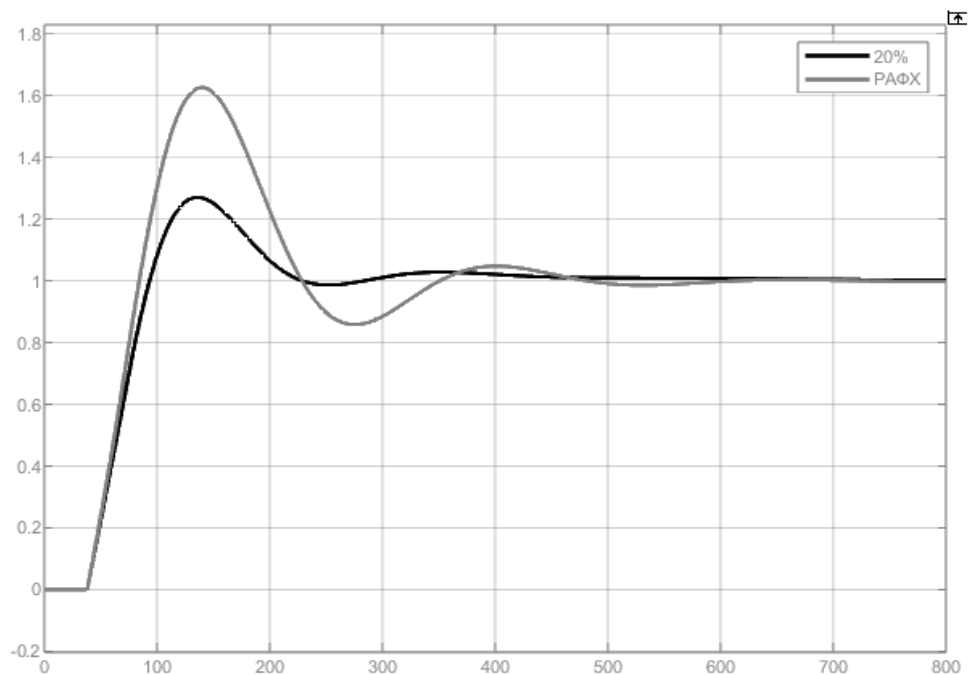


Рис. 3.11 - Перехідні характеристики двох методів за каналом “завдання-вихід”

Використовуючи модель у Simulink та отриманий перехідний процес двох моделей які використовують ПІ-регулятори розраховані різними методами, розрахуємо їх критерії якості:

Критерії якості для моделі з ПІ-регулятором, розрахованим за допомогою методу 20% перерегулювання:

$$\Delta_{\text{ст}} = 1 - y(\infty) = 1 - 1 = 0$$

$$\Delta_{\text{дин}} = y_{\text{max}} - y(\infty) = 1.271 - 1 = 0.271$$

$$\sigma = \frac{y_1}{y(\infty)} * 100\% = \frac{0.271}{1} * 100 = 27.1\%$$

$$\psi = 1 - \frac{y_3}{y_1} = 1 - \frac{0.029}{0.271} = 1 - 0.107 = 0.893$$

$$t_{\text{пп}} = 421.8$$

Критерії якості для моделі з ПІ-регулятором, розрахованим за допомогою методу РАФХ:

$$\Delta_{\text{ст}} = 1 - y(\infty) = 1 - 1 = 0$$

$$\Delta_{\text{дин}} = y_{\text{max}} - y(\infty) = 1.627 - 1 = 0.627$$

$$\sigma = \frac{y_1}{y(\infty)} * 100\% = \frac{0.627}{1} * 100 = 62.7\%$$

$$\psi = 1 - \frac{y_3}{y_1} = 1 - \frac{0.048}{0.627} = 1 - 0.076 = 0.924$$

$$t_{\text{пп}} = 440.9$$

Таблиця 3.1 Показники якості моделей за каналом “завдання-вихід”

Показник якості	20%	РАФХ
Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0.271	0.627
Перерегулювання σ , %	27.1%	62.7%
Степінь затухання ψ	0.893	0.924
Час перехідного процесу $t_{\text{пп}}$, с	421.8	440.9

Проводячи аналіз перехідних характеристик та показників якості отриманих за каналом “завдання-вихід” можна сказати, що розрахунок ПІ-регулятора за методом 20% є кращим по даному каналу, оскільки метод РАФХ має вищу динамічну похибку, також значення перерегулювання має значно вище значення ніж у метода 20% який майже у 3 рази менший, степінь затухання також гірша, хоча різниця невелика, час перехідного процесу має краще значення, але дивлячись на інші показники метод РАФХ проявив себе гірше.

Тепер розрахувавши показники якості для порівняння двох методів розрахунку ПІ-регуляторів за каналом “завдання-вихід”, можемо зняти

перехідні характеристики за каналом “збурення-вихід” для розрахунку їх критеріїв якості, перехідна характеристика показана на рис. 3.12.

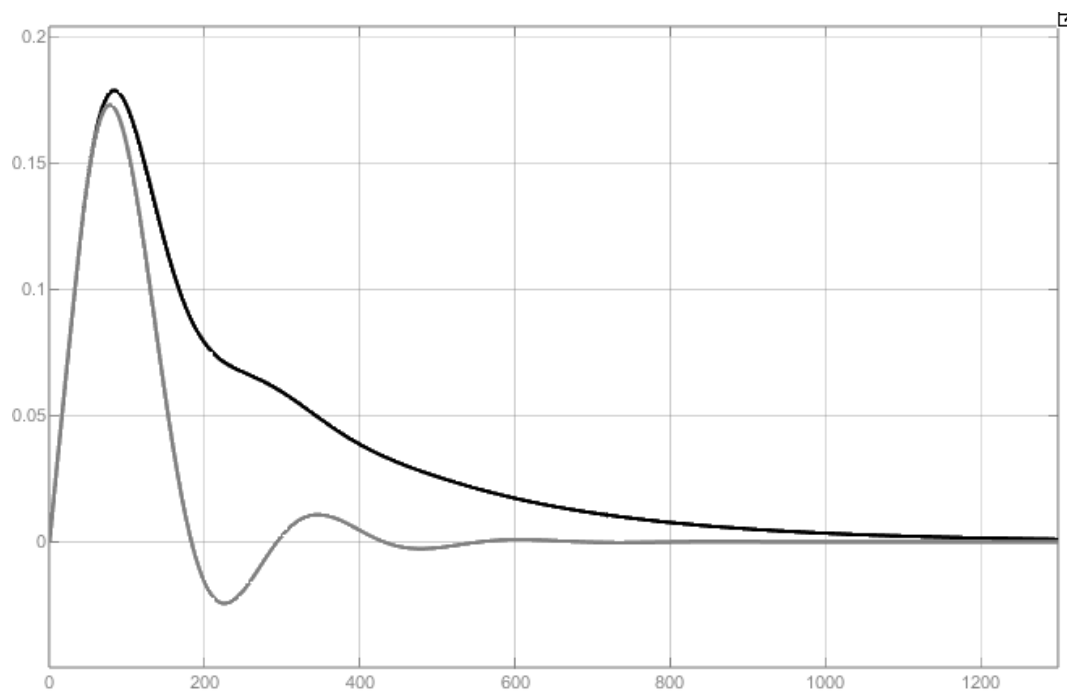


Рис. 3.12 - Перехідні характеристики двох методів за каналом “збурення-вихід”

Використовуючи модель у Simulink та отриманий перехідний процес двох моделей які використовують ПІ-регулятори розраховані різними методами, розрахуємо їх критерії якості:

Критерії якості для моделі з ПІ-регулятором, розрахованим за допомогою методу 20% перерегулювання:

$$\Delta_{ст} = y(\infty) = 0$$

$$\Delta_{дин} = y_{max} - y(\infty) = 0.1786 - 0 = 0.1786$$

$$\sigma = \frac{y_2}{y_1} * 100\% = \frac{0}{0.1786} * 100 = 0\%$$

$$\psi = 1 - \frac{y_3}{y_1} = 1 - \frac{0}{0.1786} = 1 - 0 = 1$$

$$t_{пп} = 734.5$$

Критерії якості для моделі з ПІ-регулятором, розрахованим за допомогою методу РАФХ:

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П		Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата			52

$$\Delta_{\text{ст}} = y(\infty) = 0$$

$$\Delta_{\text{дин}} = y_{\text{max}} - y(\infty) = 0.1728 - 0 = 0.1728$$

$$\sigma = \frac{y_2}{y_1} * 100\% = \frac{0.0024}{0.1728} * 100 = 13.8\%$$

$$\psi = 1 - \frac{y_3}{y_1} = 1 - \frac{0.0107}{0.1728} = 1 - 0.062 = 0.938$$

$$t_{\text{пп}} = 374$$

Таблиця 3.2 Показники якості моделей за каналом “збурення-вихід”

Показник якості	20%	РАФХ
Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0.1786	0.1728
Перерегулювання σ , %	0%	13.8%
Степінь згасання ψ	1	0.938
Час перехідного процесу $t_{\text{пп}}$, с	734.5	374

Проводячи аналіз перехідних характеристик та показників якості отриманих за каналом “збурення-вихід” можна сказати, що розрахунок ПІ-регулятора за методом РАФХ є кращим по даному каналу, оскільки хоч він і має усі показники гірші за метод 20%, крім часу перехідного процесу, але дивлячись на графік можна побачити, що по факту перехідний процес методу РАФХ кращий.

Кращим методом оберемо метод РАФХ, оскільки за каналом “збурення-вихід” він явно кращий за метод 20%, а за каналом “завдання-вихід” він сильно не відрізняється від іншого методу, саме тому доцільно буде використати в системі саме його.

3.5 Розрахунок надійності системи

В даному пункті проведемо розрахунок надійності контуру автоматичного регулювання потоку повітря з повітропроводу, що забезпечує нагрів та

підтримання встановленої температури в середині приміщення. Цей контур включає в себе такі елементи, як кімнатний датчик температури, модуль аналогових входів, контролер, модуль аналогових виходів та виконавчий механізм. Дану схему можна побачити на рис. 3.13.



Рис. 3.13 - Структурна схема контуру регулювання потоку повітря в приміщення

Оскільки дана система забезпечує комфортну температуру в приміщенні впродовж усього року, тому надійність її роботи є дуже важливою. Збій одного з приладів, які знаходяться в даному контурі може призвести до порушення температурного режиму чи неефективного використання енергії.

Виконаємо розрахунок імовірності безвідмовної роботи даного контуру регулювання, визначивши середній час напрацювання на відмову цієї системи та проаналізувавши вплив окремих приладів на сумарну надійність. Розрахувавши надійність структури наведеної на (рис. 3.13), ми можемо зробити висновки щодо ефективності даного контуру регулювання.

Для початку задамо середній час напрацювання на відмову $T_{\text{ср}}^* = 35040$ год. Згідно якого в середньому система працює безвідмовно 4 роки, це вказує на те, що дана система є високонадійною. Коефіцієнт готовності системи буде мати значення $K_{\text{гот}}^* = 0.9999$, це означає, що система буде майже увесь час працювати безвідмовно, а час ремонту даної системи буде мінімальним, що є важливим для подібних систем. Середній час напрацювання на відмову приладів: сенсор температури повітря 22RT-19-1 - 100000 год; модуль аналогових входів IB IL AI 8/SF-PAC - 500000 год; контролер ILC 151 ETH - 500000 год; модуль аналогових виходів IB IL AO 4/8/U/BP-PAC - 500000 год; виконавчий механізм LM230ASR-TP - 100000 год.

Згідно середнього часу на відмову приладів у контурі регулювання, розрахуємо інтенсивність відмов:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \frac{1}{100000} + \frac{1}{500000} + \frac{1}{500000} + \frac{1}{500000} + \frac{1}{100000} = 0.000026 \frac{1}{\text{год}}$$

Отримавши інтенсивність відмов, розрахуємо середній час напрацювання на відмову:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.000026} = 38461 \text{ год}$$

Оскільки $T_{\text{ср}} > T_{\text{ср}}^*$, можна сказати, що канал є ефективним.

Розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи системи впродовж місяця:

$$P(720) = e^{-\frac{t}{T_{\text{ср}}}} = 2.718^{-\frac{720}{38461}} = 0.98\%$$

Розрахуємо середній час для відновлення працездатності виконавчого каналу:

$$T_{\text{в}} = \frac{T_{\text{ср}} - K_{\text{гот}}^* \cdot T_{\text{ср}}}{K_{\text{гот}}^*} = \frac{38461 - 0.9999 \cdot 38461}{0.9999} = 3.84 \text{ год}$$

На основі даних розрахунків були отримані ключові показники надійності системи автоматичного регулювання потоку повітря у приміщення. Інтенсивність відмов виконавчого каналу має значення 0.000026 1/год, а показник середнього часу напрацювання на відмову становить 38461 годин. Такі значення дозволяють вважати контур регулювання надійним.

Розрахована ймовірність роботи системи протягом місяці становить 98%, що є високим показником для автоматизації побутової системи та гарантує стабільну роботу даного контуру регулювання.

Середній час відновлення працездатності виконавчого каналу у випадку відмови, який має значення 3.84 години відповідає допустимим часовим межам для того, щоб швидко виконати технічне обслуговування та відновити роботу системи. Таким чином можемо сказати, що система є надійною.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		55

4 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМИ ПОВІТРЯНОГО ОПАЛЕННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ

В даному розділі представлено обладнання та програмні засоби, які забезпечують автоматизоване керування системою повітряного опалення приватного будинку. Розглядено вибрані для цієї задачі датчики, ВМ, ПЛК, а також було розроблено програмну логіку для контролера та засоби візуалізації.

4.1 Технічні рішення контролю параметрів повітряної системи опалення приватного будинку

Система повітряного опалення приватного будинку оснащена чотирма різними типами датчиків для контролю параметрів у системі. Вони використовуються для відслідковування значень температури повітря та води в системі, температури в приміщеннях будівлі, а також допустимість тиску в системі повітропроводів.

Усі ці датчики використовуються для забезпечення постійного контролю та моніторингу параметрів системи дозволяючи сигналізувати про зміни в важливих показниках системи. Таким чином забезпечуються оптимальні умови для використання системи та уникнення аварійних ситуацій, забезпечуючи оптимальні умови датчики також допомагають підвищити енергоефективність системи. Відслідковуючи значення параметрів системи отримується можливість швидкого реагування на відхилення у системі, що допомагає у швидкому виявленні та виправленні проблеми, таким чином мінімізуючи ризики для системи.

Для контролю температури в повітропроводах системи повітряного опалення використовуються два датчика Belimo 22СТ-14Н, що мають діапазон вимірювання $-50...180\text{ }^{\circ}\text{C}$ та вихідний сигнал $4...20\text{ mA}$ зображений на рис. 4.1.

Даний датчик вимірює температуру припливного повітря (позиція 4в), що надходить у систему повітропроводів. Залежно від температури повітря виконується керування переключенням роботи калорифера та охолоджувача

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		56

для забезпечення необхідного регулювання температури в системі до комфортного значення.

Також даним датчиком вимірюється температура повітря в системі після проходження повітрям калорифера та охолоджувача (позиція 4б), що дає розуміння про температуру повітря в системі та дає можливість керувати ВМ так, щоб досягти необхідної температури.



Рис. 4.1 - Датчик температури Belimo 22CT-14N

Для контролю температури в приміщеннях використовуються чотири сенсори температури Belimo 22RT-19-1, по одному для кожного приміщення, даний датчик має діапазон вимірювання $0...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та вихідний сигнал $0...10\text{ В}$ зображений на рис. 4.2.



Рис. 4.2 - Сенсор температури Belimo 22RT-19-1

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		57

Використовується для вимірювання температури в приміщеннях (позиції 5а - 8а). Даний датчик необхідний для регулювання температурою в приміщенні за допомогою заслінок, які регулюють подачу повітря з необхідною температурою із повітропроводів для забезпечення комфортного проживання в будинку.

Для контролю температури води використовується один датчик температури MBT 5250, що має діапазон вимірювання $-50 \dots 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та вихідний сигнал $4 \dots 20 \text{ мА}$ зображений на рис. 4.3.

Даний датчик вимірює температуру зворотного теплоносія калорифера (позиція 4д). Даний датчик потрібен для відстеження температури зворотнього теплоносія та регулювання подачі гарячої води на калорифер у випадку, якщо температура буде доволі низькою, щоб запобігти замерзанню води та уникнути пошкоджень системи.



Рис. 4.3 - Датчик температури MBT 5250

Для контролю тиску використовується три пресостати PSW-200-PVC, що мають діапазон вимірювання $20 \dots 200 \text{ Па}$ та зображений на рис. 4.4.

Пресостат використовується для контролю тиску на фільтрі (позиція 1а). Даний датчик стоїть в системі для відстеження засмічення фільтра, за рахунок чого перепад тиску збільшиться, а при його перевищенні буде подаватись дискретний сигнал до ПЛК для сигналізування.

						ТА - 11394 . 0014 . 001 . АТХ . П	Арк .
Зм .	Кільк .	Арк .	№ док .	П і д н .	Дата		58

Також використовується для вимірювання тиску на каналних вентиляторах (позиції 2а та 3а). Ці датчики відслідковують перепади тиску на вентиляторах, що дає розуміння про наявність аварійних ситуацій пов'язаних з ними, в такому випадку подається дискретний сигнал для сигналізування про дану аварію.



Рис. 4.4 - Пресостат PSW-200-PVC

Датчики встановлені в систему виконують ключову роль у забезпеченні її стабільної, ефективної та безпечної роботи. Вони безперервно вимірюють ключові параметри системи, такі як температура повітря в системі, температура повітря в приміщенні, температура зворотнього теплоносія від калорифера та наявність перевищення порогу тиску на фільтрі та каналних вентиляторах. Отримані дані від цих датчиків передаються до ПЛК, де вони попередньо обробляються та аналізуються. Після чого отримана інформація подається до SCADA-системи, яка дозволяє в режимі реального часу візуалізовувати та контролювати стан системи. Таким чином датчики які використовуються в системі використовуються для регулювання параметрів в системі та їх візуалізації для зручного контролю та запобігання аварійних ситуацій, які можуть виникнути під час роботи системи повітряного опалення. Це дозволяє оперативно реагувати на відхилення в системі, підвищує її надійність та комфорт у її використанні.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		59

4.2 Технічні рішення регулювання параметрів повітряної системи опалення приватного будинку

Розглянемо автоматизацію повітряного опалення приватного будинку. Автоматизація таких систем зменшує людський фактор, дозволяючи підвищити точність регулювання температури повітря та забезпечити швидке реагування на аварійні ситуації при роботі системи. Таким чином також зменшуються витрати на обслуговування та збільшуючи ефективність системи.

В даній системі регулюються такі параметри: температура повітря в системі повітропроводів, температура повітря в приміщеннях, температура води на зворотному каналі від калорифера.

Для контуру регулювання температури повітря в системі повітропроводів використовується датчик температури Belimo 22СТ-14Н (позиція 4б) зображений на рис. 4.1. Цей датчик передає сигнал до ПЛК Phoenix contact ILC 151 ЕТН (позиція 1б) зображений на рис. 4.5. Після чого контролер передає сигнал до одного з ВМ Belimo LR230А (позиція 4а, 4г) зображений на рис.4.6, який керує подачею теплоносія чи хлорогену до калорифера чи охолоджувача, вибір виконавчого механізму здійснюється за допомогою іншого датчика температури Belimo 22СТ-14Н (позиція 4в), який в залежності від температури має передавати сигнал до ПЛК, що вирішує при якій температурі, який з ВМ має працювати на даний момент для забезпечення необхідної температури в системі.



Рис. 4.5 - ПЛК Phoenix contact ILC 151 ETH

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		60



Рис. 4.6 - BM Belimo LR230A

Таким чином забезпечується автоматичне регулювання температури в системі повітропроводів для подальшої подачі даного повітря у приміщення для досягнення комфортної температури, що є основним завданням даної системи.

Для контурів регулювання температури в приміщеннях використовуються сенсори температури Belimo 22RT-19-1 (позиції 5а - 8а) зображений на рис. 4.2. Цей датчик передає сигнал на ПЛК Phoenix contact ILC 151 ETH (позиція 16) зображений на рис. 4.5. Після чого контролер передає сигнал до BM LM230ASR-TP (позиція 5б - 8б) зображений на рис. 4.7, який керує подачею теплого повітря до приміщень в будинку.



Рис. 4.7 - BM LM230ASR-TP

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		61

За допомогою даних контурів регулювання відбувається регулювання температури в приміщеннях будинку, що забезпечує керуванням основним параметром даної системи.

Для контуру регулювання температури води на зворотному каналі від калорифера використовується датчик температури MBT 5250 (позиція 4д) зображений на рис. 4.3. Цей датчик передає сигнал до ПЛК Phoenix contact PLC 151 ETH (позиція 1б) зображений на рис. 4.5. Після чого контролер передає сигнал до ВМ Belimo LR230A (позиція 4г) зображений на рис. 4.6, який керує подачею гарячої води до калорифера для того, щоб у випадку низьких температур в системі можна було запобігти замерзання води та уникнути пошкоджень в системі.

За допомогою даного контуру регулювання запобігається виникнення аварійних ситуацій пов'язаних з низькою температурою води в системі.

Контури регулювання параметрами в системі є необхідною частиною автоматизованої системи керування, яка забезпечує стабільну роботу системи повітряного опалення та допомагає збільшити енергоефективність та запобігти аварійним ситуаціям. За допомогою даних контурів забезпечуються необхідні температури для комфортного проживання в будівлі, а також максимально оптимізується робота системи, в якій елементи співпрацюють один з одним для безперебійної роботи.

Дані параметри дозволяють здійснювати ефективний контроль та управління за допомогою чого можна виявити аварійні ситуації та можливі проблеми в роботі системи. Така автоматизована система з використанням SCADA-системи дозволяє планувати обслуговування, забезпечувати зручне керування системою та збільшити ефективність та безпечність її експлуатації на протязі всього строку роботи.

У підсумку з усього сказаного раніше, можна сказати, що така система повітряного опалення забезпечує необхідний контроль та регулювання необхідних параметрів системи для зручного та безпечного використання.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		62

4.3 Опис контролера Phoenix contact ILC 151 ETH

В даному розділі буде описано чому обрано контролер, що використовується в автоматизації повітряної системи опалення приватного будинку. Саме від нього залежить надійність, гнучкість та ефективність роботи всієї системи керування.

Для реалізації автоматизованого керування було обрано ПЛК Phoenix contact ILC 151 ETH, який відповідає вимогам швидкодії, надійності та функціональності. Даний контролер оснащений 32-бітним процесором з тактовою частотою 400 МГц, що забезпечує швидке виконання операцій з часом циклу менше 1 мс.

Надійність роботи контролера підтверджується виконанням корпусу IP20 з підвищеною стійкістю до електромагнітних перешкод, можливістю роботи при діапазонах температури 0...55 °C та показником середнього часу напрацювання на відмову понад 100000 годин. Присутній вбудований watchdog-таймеру, що забезпечує автоматичне відновлення роботи при виникненні збоїв в роботі.

Можливість додавання модулів розширення, що дозволяє збільшити кількість входів та виходів для ПЛК. В моїй системі використовуються додатково такі модулі: один модуль IB IL 24 DO 4-PAC для збільшення цифрових виходів, два модулі IB IL AI 8/SF-PAC для збільшення кількості аналогових входів, один модуль IB IL AO 4/8/U/VP-PAC та ще один модуль IB IL AO 2/UI-PAC для збільшення кількості аналогових виходів.

Даний ПЛК підтримує сучасні промислові протоколи, включаючи Ethernet TCP/IP для зв'язку з SCADA-системами, Modbus TCP/RTU для інтеграції з сенсорами та іншими ПЛК та OPC UA через CODESYS 3 для обміну даними з корпоративними системами.

У підсумку, ILC 151 ETH є оптимальним варіантом для реалізації системи повітряного опалення та поєднує в собі високу продуктивність, гнучкість при розширенні, багато способів комунікації та надійність у промислових умовах.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		63

4.4 Програмні рішення управління повітряною системою опалення приватного будинку

Для виконання задачі по регулюванню температури в приміщенні було використано програмне середовище Codesys, яке підтримується обраним ПЛК. Реалізоване керування за допомогою функціонального блоку Control_Room_Temp, який виводить на виході температуру приміщення для якого виконується регулювання.

Даний функціональний блок наведений на рис. 4.8 має такі параметри, за допомогою яких можна впливати на регулювання температури в приміщенні: On - включення системи регулювання, SetValue - задання необхідного значення температури, Kp - коефіцієнт підсилення регулятора, Ti - значення інтегральної складової регулятора, ManualValue - процент повороту заслінки при виникненні аварійної ситуації з датчиком температури, MaxNormalValue - максимальне нормальне значення температури повітря в приміщенні, MinNormalValue - мінімальне нормальне значення температури повітря в приміщенні.

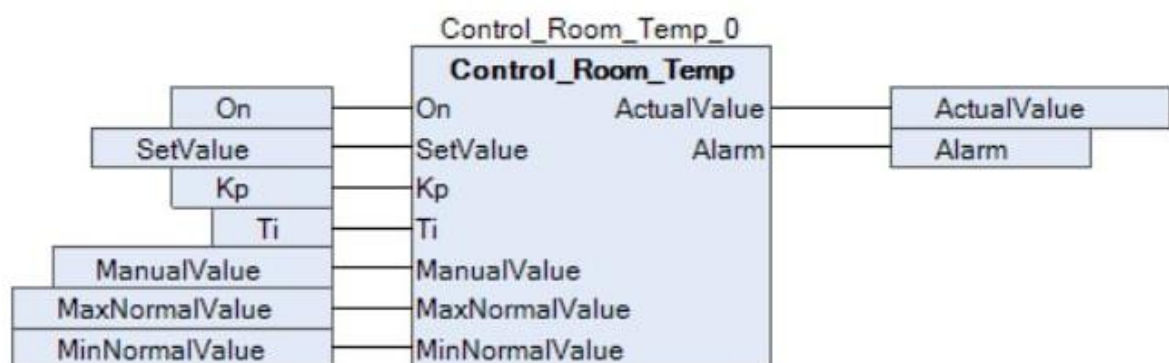


Рис. 4.8 - Функціональний блок контролю температури в приміщенні

Функціональний блок складається з таких елементів: PID-регулятор, Transp_Delay, Object та логіка для виявлення порушень роботи датчику температури. Усі елементи функціонального блоку показані на рис. 4.9.

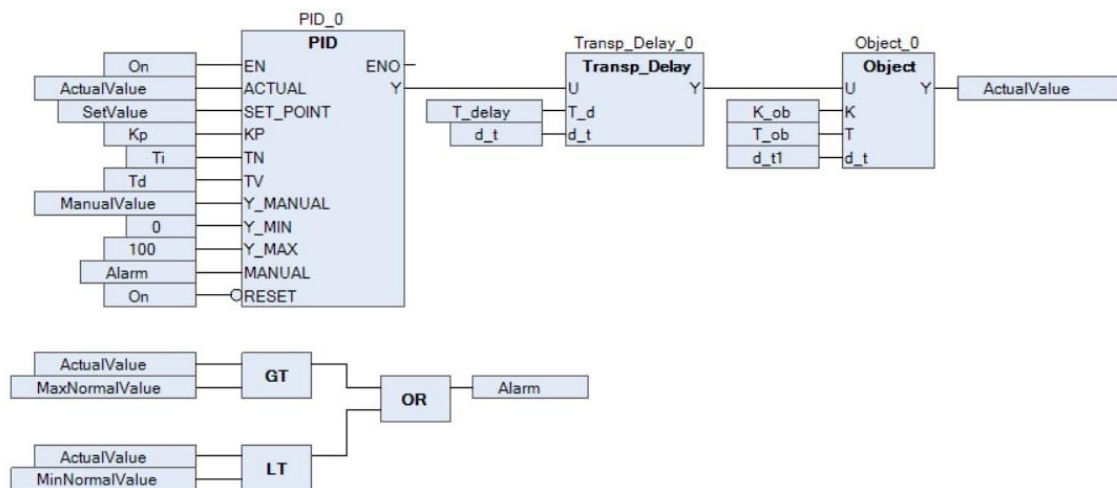


Рис. 4.9 - Внутрішня будова функціонального блоку Control_Room_Temp

PID-регулятор використовується для регулювання температури в приміщенні, для перетворення його у ПІ-регулятор необхідно лише подавати на диференційну частину значення нуль.

Transp_Delay використовується для створення затримки сигналу, що надходить до об'єкту управління.

Object моделює поведінку об'єкта управління та приймає на себе сигнал від регулятора з запізненням впливаючи на температуру приміщення. Оскільки в минулих розділах було отримано розширений ОК, а потім він був апроксимованим, тоді в якості ОК було взято аперіодичну ланку яка була розрахована.

Також система має логіку, яка виявляє порушення в роботі датчику температури, що відповідає за регулювання температури в даному приміщенні. Якщо на датчику будуть показуватися ненормальні значення, їх можна задавати у функціональному блоці на (рис. 4.8), то він активує змінну Alarm, яка відповідає за сповіщення про аварійну ситуацію. При спрацюванні аварійної ситуації у системі перемикається режим роботи регулятора на ручний при якому регулятор на виході виставляє значення ManualValue, значення даного параметру також можна встановити на функціональному блоці для регулювання температури в приміщенні.

4.5 Розробка інформаційно керуючої системи

Для даного проєкту було створено SCADA-систему для візуалізації та керування системою повітряного опалення приватного будинку. В якості середовища для розробки даної системи було обрано Web Studio, оскільки вона доволі гнучка та легко інтегрується з контролером, як локально, так і віддалено.

Вибір програми Web Studio оснований на широких можливостях середовища розробки SCADA-систем, оскільки вона підтримує OPC-сервера, може працювати з протоколами Modbus та Ethernet/IP, наявність легкого для розуміння графічного редактору та присутність вбудованих мов програмування.

У розробленій SCADA-системі присутні такі вікна: Menus, Mimics, Trends та Alarms.

Вікно Menus зображено на рис. 4.10 та використовується для переходу між усіма вікнами в системі та вимикати її, також реалізує систему авторизації користувачів, що впливає на доступність до системи.



Рис. 4.10 - Вікно Menus

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		66

Вікно Mimics зображено на рис. 4.11 та використовується для відслідковування роботи системи в реальному часі з графічним відображенням її структури. Також присутня нижня панель для відслідковування та управління системою повітряного опалення.

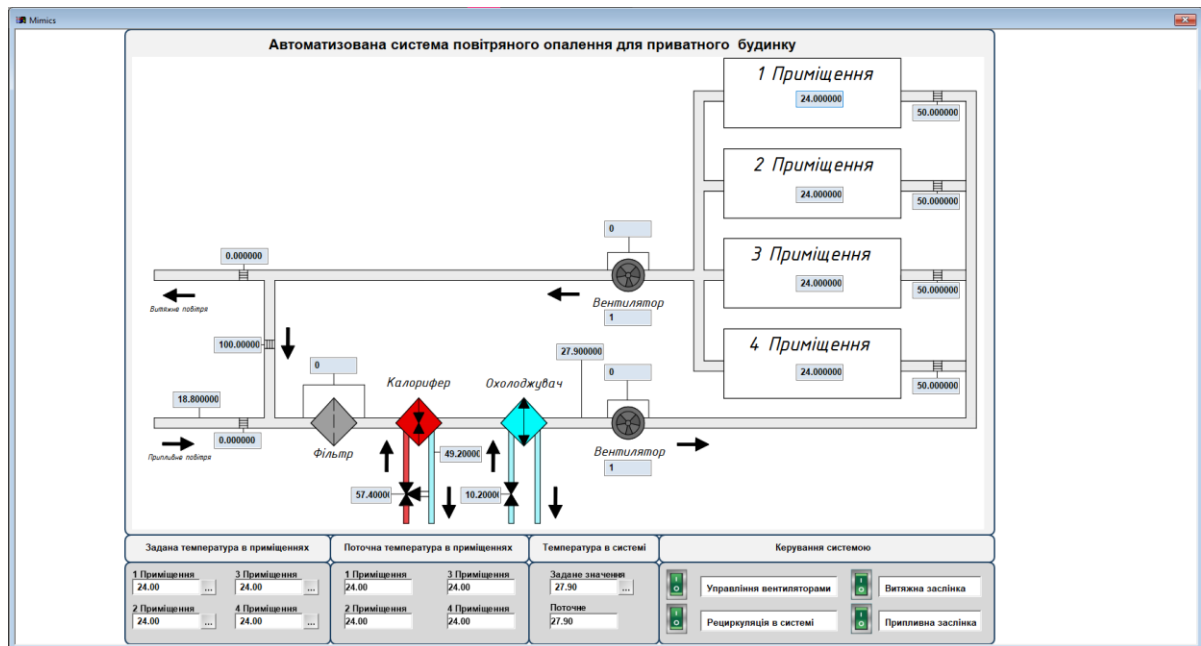


Рис. 4.11 - Вікно Mimics

Вікно Trends зображено на рис. 4.12 та використовується для відслідковування показників ключових параметрів на графіках.

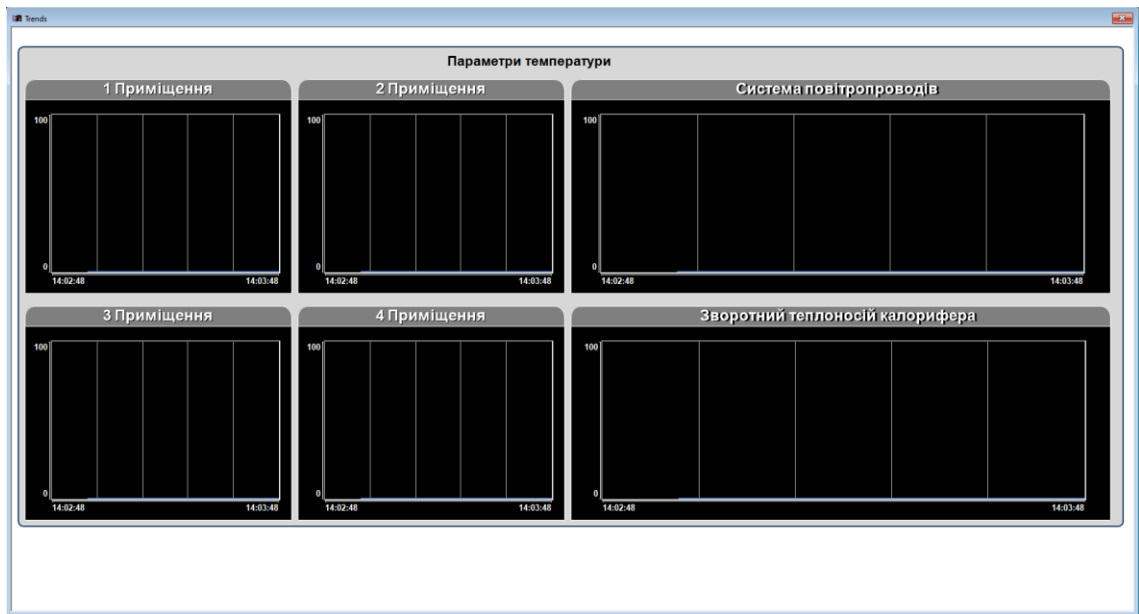


Рис. 4.12 - Вікно Trends

Вікно Alarms зображено на рис. 4.13 та використовується для відслідковування помилок, що відбуваються в системі. Також відображаються дії, що відбувались в SCADA-системі при її використанні, а саме відкриття та закриття вікон.

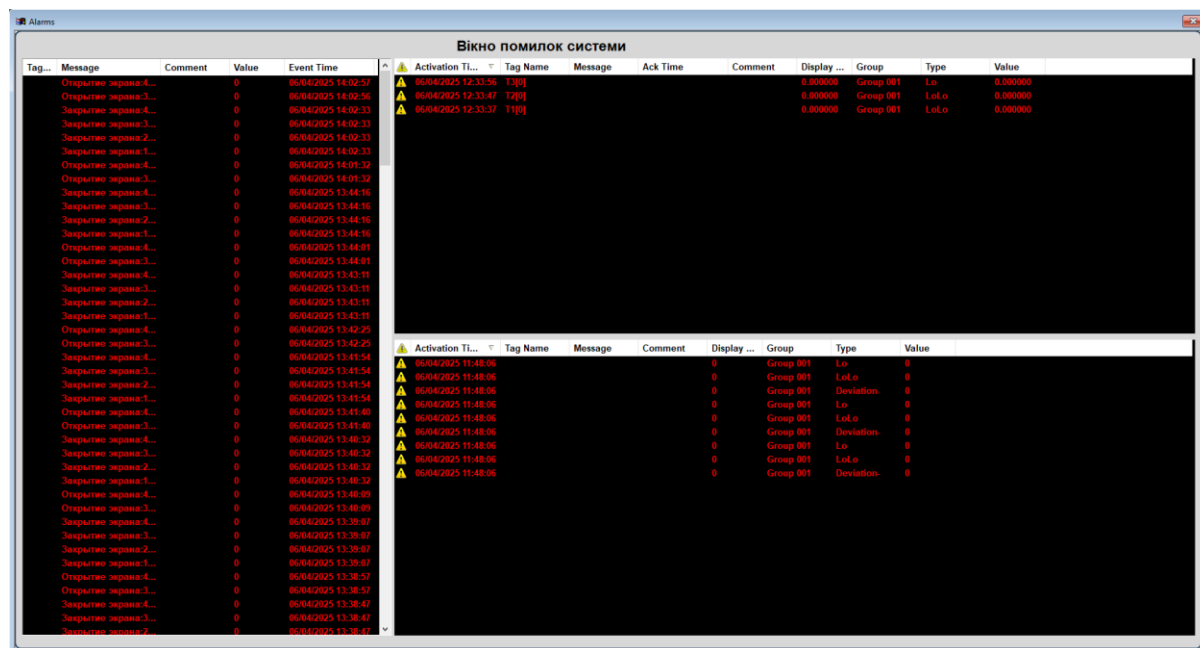


Рис. 4.13 - Вікно Alarms

Розроблена SCADA-система забезпечує повноцінне візуальне представлення та управління системою повітряного опалення приватного будинку. Система інтегрована з усіма елементами керування, що дозволяє в режимі реального часу контролювати параметри температури як у системі, так і в приміщеннях.

Система відображає поточні значення температури основних показників системи у вигляді графіків та цифрових значень, таким чином даючи зручний інструмент для моніторингу даних значень.

Також система надає зручне вікно для індикації аварійних ситуацій та відхилень значень від нормальних значень за допомогою чого можна швидко реагувати на такі проблеми.

У підсумку розроблена SCADA-система забезпечує зручне керування системою та представляє усі необхідні параметри системи в реальному часі.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є однією з ключових складових системи управління будь-якої організації, яка направлена на збереження здоров'я та безпеку праці людини під час виконання нею своїх трудових обов'язків. Основним завданням системи управління охороною праці в організації є створення умов, що виключають або мінімізують ризики отримати травми або професійні захворювання працівниками під час експлуатації і обслуговування технологічного устаткування та процесів, а також у разі виникнення аварійних ситуацій.

Реалізація будь-яких технічних проєктів має бути основана на запобіганні ризиків та безпечній експлуатації об'єкту проєктування. Безпека повинна враховувати як технологічні, так і людські фактори.

В даному розділі розглянуті запропоновані технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації водяного калорифера та охолоджувача і елементів повітропроводу, визначені основні заходи з гігієни праці та виробничої санітарії, які повинні бути забезпечені при експлуатації системи опалення, а також необхідні заходи з пожежної безпеки та профілактики. Особлива увага приділена організаційним та технічним засобам мінімізації ризиків, що пов'язані з циркуляцією теплоносія, впливом температур, електроспоживанням та обслуговуванням системи. Крім того, розглянуті питання щодо забезпечення надійності та довговічності приладів, а також впровадження автоматизованих систем контролю, які дозволять усувати потенційно небезпечні відхилення в роботі системи.

5.1 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки експлуатації технологічного устаткування та засобів автоматизації

Для забезпечення надійної та безпечної роботи припливно-витяжної системи повітряного опалення було встановлено датчики перепаду тиску на каналних вентиляторах та фільтрі, що дозволяє контролювати рівень їх забруднення та стан повітропровід. У разі перевищення певного порогу тиску

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		69

вмикаються сигнальні світлодіоди, що свідчить про необхідність обслуговування. Також датчики на каналних вентиляторах фіксують механічні та електротехнічні несправності, тим самим запобігаючи виникненню аварій згідно вимог ДСТУ EN 60204-1:2015.

У спроектованій системі передбачено можливість дистанційного керування та моніторингу за рахунок використання логічного контролера та відповідного програмного забезпечення. При її експлуатації можна спостерігати в режимі реального часу за ключовими параметрами роботи системи, що дає можливість оперативно реагувати на аварійні ситуації та відхилення в роботі системи без необхідності присутності біля самої системи фізично. Такий підхід відповідає вимогам автоматизованих систем керування відповідно до ДСТУ EN 61508-7:2019.

Підтримка стабільної та безпечної роботи системи опалення забезпечується регулярними плановими оглядами та технічним обслуговуванням. До переліку обов'язкового огляду входить огляд фільтру, кріплення повітропроводів, огляд каналних вентиляторів та електричних з'єднань. Окрема увага має приділятися справності повітряних заслінок та виконавчих механізмів, стану теплоносія у водяному калорифері та охолоджувачі, що впливає на якість подачі повітря та енергоефективність системи, а також на забезпечення нормованих параметрів мікроклімату відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99.

Під час технічного огляду системи також треба приділяти особливу увагу технічному стану водяного калорифера та охолоджувача, оскільки вони є основою повітряної системи опалення. У калорифера оглядають теплообмінні поверхні на наявність забруднення, корозію або пошкодження, окрім цього перевіряється герметичність з'єднань та відсутність протікань теплоносія. В охолоджувачі додатково до того, що оглядається в калорифері, необхідно перевірити стан дренажної системи для відведення конденсату, справність арматури та чистоту внутрішніх каналів. Своєчасне виявлення несправностей у системі запобігає зниженню ефективності та виникнення аварійних ситуацій у

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		70

системі. Також проєктом передбачено, що всі вузли системи розміщені з урахуванням зручного доступу до них для обслуговування та огляду. Досягається це за допомогою оглядових люків, знімні секції повітропроводів та доступ через монтажні елементи відповідно до ДБН В.2.5-67:2013.

При виникненні аварійних ситуацій необхідно виконати обов'язкове проведення детального огляду системи та проведення аналізу причин виникнення несправності та виконати ретельну перевірку елементів, які стали причиною аварії або могли пошкодитись внаслідок даної аварії. За результатами огляду розробляються відповідні заходи з метою усунення наслідків аварії та впровадження технічних і організаційних змін, які дозволять уникнути повторення подібних ситуацій в майбутньому. Даний підхід дозволяє підтримати високий рівень безпеки використання системи протягом її існування та відповідають підходу ризикоорієнтовного управління безпекою рекомендованому ISO 45001:2018.

Система не передбачає постійного робочого місця персоналу біля обладнання, але в разі виконання робіт пов'язаних із системою, забезпечено безпечний доступ до всіх вузлів. Це включає в себе огороження рухомих частин, відсутність відкритих елементів та можливість блокування живлення згідно з ПУЕ-2017.

Таким чином, система повітряного опалення не лише відповідає сучасним вимогам щодо енергоефективності, але й забезпечує надійність та безпечність функціонування завдяки запровадженим технічним рішенням, автоматизованому моніторингу, плановому обслуговуванню та системному аналізу аварійних подій. Крім того, спроектована система орієнтована на довговічну експлуатацію з можливістю масштабування та модернізації, а також передбачає реалізацію діючих вимог з охорони праці для мінімізації ризиків під час роботи з об'єктом та забезпеченню комфортних умов, як для персоналу, так і для мешканців будівлі.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		71

5.1.1 Електробезпека

Електропостачання автоматизованої системи повітряного опалення виконується за допомогою трифазної електромережі, яка має змінний струм напругою 220/380 В та частотою 50 Гц з глухозаземленою нейтраллю. Застосована система захисного заземлення TN-S відповідно до вимог ПУЕ-2017. Вентилятори, виконавчі механізми та контролер належать до III категорії надійності електропостачання тому, що їх можна відключити на певний час для забезпечення безпеки при роботі з обладнанням. Захисне заземлення виконується з використанням як природних, так і штучних заземлювачів, що забезпечує опір заземлення не більше 4 Ом, що відповідає вимогам ДСТУ EN 61140:2017 та ПУЕ-2017.

Категорія приміщення за можливістю ураження електричним струмом, у якому розташоване обладнання АСК, оцінюється, як приміщення з підвищеною небезпекою, оскільки в ньому можлива наявність підвищеної вологи та існує можливість одночасного дотику до електропровідних частин ЕУ та до заземлених металоконструкцій будівлі та технологічного устаткування. Зважаючи на такі фактори, передбачено реалізацію технічних рішень, що допоможуть запобігти ураженню струмом відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.21-98 та ДСТУ EN 60204-1:2015.

Технічні рішення для запобігання електротравм:

- Захист від контакту з нормально струмоведучими елементами ЕУ полягає у встановленні усіх струмоведучих частин в металеві або пластикові корпуси, які мають ступінь захисту не менше IP44, що виключає можливість випадкового дотику до них. Усі електричні з'єднання виконані із застосуванням закритих клем з маркуваннями та фіксацією, також присутній захист від переполюсовки. Кабельні лінії прокладено у вогнестійких гофротрубах відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016.
- Захист від переходу напруги на корпуси здійснено за допомогою заземлення усіх металевих корпусів. Передбачено застосування системи захисного заземлення TN-S, що забезпечує автоматичне вимкнення

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		72

живлення ЕУ у разі короткого замикання або перевантаження. Для ефективного захисту використано автоматичні вимикачі типу С або D, що забезпечують кратність струму короткого замикання не менше 5-10 до номінальних струмів їх спрацювання.

- Захисне вимкнення живлення забезпечується шляхом встановлення автоматичного вимикача та вимикачів навантаження, що гарантує вимкнення електроживлення ЕУ у разі аварійної ситуації.

Таким чином, діючі вимоги з електробезпеки забезпечуються як на конструктивному рівні виконання обладнання, так і завдяки реалізації комплексних технічних заходів, що дозволяють уникнути електротравм, а також дають змогу автоматично вимикати живлення при аваріях, що дає можливість знизити рівень існуючих ризиків під час використання об'єкту. Дані рішення прийнято на основі чинних нормативних документів в галузі охорони праці та електробезпеки.

5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з гігієни праці та виробничої санітарії

Забезпечення належних умов праці являється важливою складовою безпечного використання будь-якої системи. Розглядаючи повітряну систему опалення, актуальність таких умов набувається під час монтажу, технічного обслуговування та модернізації системи, коли з об'єктами системи контактує обслуговуючий персонал, оскільки постійного перебування персоналу біля обладнання не передбачається.

Умови, для яких розроблені рішення стосуються закритих побутових або технічних приміщень, де знаходиться необхідне обладнання для системи. Цей розділ розглядає ключові чинники, які впливають на умови праці: мікроклімат приміщення, якість повітря у робочій зоні, рівень освітленості, шумове навантаження, вібрації, а також можливі випромінювання, що виникають у процесі роботи обладнання. Кожен з цих факторів має відповідати

						ТА - 11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		73

нормативним вимогам, а відхилення від норми можуть мати негативний вплив на здоров'я працівників та довгострокову надійність системи.

У підрозділах наведених нижче будуть проаналізовані технічні рішення та організаційні заходи, які передбачено в проєкті для контролю та зниження впливу зазначених чинників до безпечного рівня відповідно до чинних нормативних документів ДСН 3.3.6.042-99, ДБН В.2.5-28:2018, ДСТУ EN 16798-3:2021 і т.д.

5.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат у приміщеннях в яких встановлено систему повітряного опалення є важливим фактором для забезпечення комфортних умов праці персоналу під час монтажу та обслуговування системи. Джерелами впливу на мікроклімат у даній системі є припливно-витяжна система вентиляції з рециркуляцією з вмонтованою системою опалення, чим і є сама система над якою буде проводитись робота.

Згідно ДСН 3.3.6.042-99, для легкої роботи в холодний період року оптимальна температура повітря має становити 22-24°C, допустима 20-25°C, відносна вологість має мати значення 40-60%, а швидкість повітря має не перевищувати 0.2 м/с. Під час теплого періоду дані значення становлять 23-25°C при оптимальному значенні, 21-28°C при допустимих, вологість має бути в районі 40-60%, а швидкість повітря не перевищувати 0.3 м/с.

Дана система може підтримувати такі значення за допомогою автоматичного регулювання температури повітря, здатності надавати свіже повітря в будівлю, а також завдяки раціональному розміщенню повітропроводів для забезпечення рівномірного розподілу повітря. Таким чином, дана система виконує вимоги для норм мікроклімату згідно чинним нормативним документам.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		74

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Стан повітря у робочій зоні під час обслуговування системи повітряного опалення має відповідати вимогам ДСТУ EN 16798-3:2021, де вказані допустимі концентрації шкідливих речовин. У цьому проєкті єдиними можливими забруднювачами можуть бути пил із фільтру та повітропроводів та залишкові пари мийних засобів після чистки обладнання. Гранично допустима концентрація для неорганічного пилу становить до 6 мг/м³.

Для запобігання перевищенню допустимих концентрацій у системі встановлено фільтр тонкого очищення та датчик для контролю перепаду тиску, що сигналізує про необхідність очищення. Регулярне обслуговування системи та заміна фільтрів забезпечує припливу свіжого повітря, що відповідає вимогам.

5.2.3 Виробниче освітлення

У даній системі повітряного опалення постійне перебування персоналу не передбачено, але під час огляду та обслуговування системи необхідно забезпечити належне освітлення. У технічному приміщенні передбачене використання як природного, так і штучного освітлення, яке має відповідати вимогам ДБН В.2.5-28:2018.

Природне освітлення реалізується за допомогою вікон або світлових люків, що забезпечують коефіцієнт природного освітлення не менше 1.5% для зорових робіт, що мають розряд V та підрозряд «б». Штучне освітлення реалізовано за допомогою стельових світлодіодних світильників, які забезпечують світло на рівні 150 люкс, що є нормативом для технічних приміщень. За необхідності також можна використовувати переносні джерела світла для огляду важкодоступних елементів системи. Таким чином гарантуються безпечні умови для виконання огляду та обслуговування.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		75

5.2.4 Виробничий шум

Дана система має джерела шуму такі, як каналні вентилятори та виконавчі механізми, що створюють шум у будівлі. Рівень шуму даної системи не має перевищувати допустимих значень, які приведені у ДСН 3.3.6.037-99.

Відповідно допустимим рівнем звуку для технічного приміщення становить до 75 дБА, в той час, як для житлових приміщень даний рівень має становити до 55 дБА вдень та до 45 дБА вночі. Згідно технічним характеристикам, рівень звуку в житлових приміщеннях після проходження повітря по повітропроводу не перевищує 40-45 дБА.

Для зниження шуму використовуються гнучкі вставки, віброізоляція каналних вентиляторів та шумоізоляція технічного приміщення. За допомогою таких методів відбувається відповідність нормам та комфортним умовам проживання в будівлі.

5.2.5 Виробничі вібрації

Система повітряного опалення має такі джерела вібрацій, як каналні вентилятори та виконавчі механізми, які впродовж своєї роботи створюють вібрації, що можуть передаватися не тільки в технічному приміщенні, а й до житлової зони в будівлі.

Відповідно до ДСН 3.3.6.039-99 допустимий рівень віброшвидкості залежить від частоти, напрямку та тривалості дії. У даному об'єкті вібрація має низьку інтенсивність, виходячи з чого, очікуваним рівнем віброшвидкості буде значення менше за 0.1 мм/с, що підлягає в допустимі значення як для технічного приміщення, так і для житлового будинку.

Для запобігання передавання вібрацій до житлової зони, проєкт передбачає застосування віброізоляції вентиляторів, монтажу гнучких вставок у повітропроводів, а також механічне розділення обладнання та несучих конструкцій будівля. За допомогою таких заходів, можна забезпечити як захист персоналу, так і комфорт для мешканців будівлі, прибираючи вібраційний дискомфорт при роботі системи.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		76

5.2.6 Виробничі випромінювання

У системі повітряного опалення можливі незначні рівні електромагнітного випромінювання низької частоти, основним джерелом таких випромінювань є електричні приводи виконавчих механізмів та релейне обладнання.

Відповідно до ДСН 3.3.6.096-2002, нормуються напруженості електричного поля до 500 В/м та магнітного поля до 80 А/м у діапазоні частот 50 Гц. Усі елементи системи мають низький рівень електромагнітного випромінювання та не перевищують значення допустимих значень.

Для зниження впливу випромінювань застосовується екранування елементів управління та використання герметичних корпусів реле. Підсумовуючи, система не має інтенсивних джерел випромінювання, а присутнє випромінювання не перевищує допустимих значень.

5.3 Пожежна безпека та профілактика

Пожежна безпека є важливим аспектом під час проєктування системи повітряного опалення, особливо в умовах житлового використання. Дана система містить пожежонебезпечне електричне обладнання таке, як каналні вентилятори, реле, виконавчі механізми, елементи живлення та контролер. Також присутні матеріали, що є пожежонебезпечними, а саме теплоізоляційні матеріали та ущільнення.

Оскільки в системі немає вибухонебезпечних речовин, джерел вогню та горючих матеріалів, виробничі приміщення з технологічним обладнанням системи відносяться до категорії В за пожежною небезпекою відповідно до ДСТУ Б.В.1.1-36:2016 та НПАОП 40.1-1.32-01. За існуючою класифікацією робочі зони цих приміщень за пожежонебезпекою відноситься до класу П-Па тому, що в приміщенні присутні тверді горючі матеріали, наприклад теплоізоляція.

У наступних підрозділах наведено рішення для забезпечення запобігання виникнення пожежі та заходи для обмеження наслідків у разі виникнення вогню.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		77

5.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Для зниження ризиків виникнення пожежі було впроваджено певні організаційні рішення. По перше, електрообладнання знаходиться у закритому корпусі з рівнем захисту не нижче IP44, що відповідає вимогам. Усі електричні з'єднання виконані в негорючих клемниках та кабель-каналах, які мають високий захист від температур, що не підтримує горіння.

Живлення системи виконується за допомогою проходження через автоматичний вимикач з тепловим та струмовим захистом, що допоможе швидко знеструмити лінію при короткому замиканні чи перевантаженні. Також присутні вимикачі навантаження, які теж допоможуть зберегти цілісність системи при аварійних ситуаціях. У разі необхідності система може бути вимкнена вручну в разі виявлення несправностей в роботі або загоряння.

Середовище технічного приміщення не є пожежонебезпечним та не має вибухових речовин, а стіни та стеля встановлені у виконанні важкогорючих матеріалів, що уповільнює розширення полум'я в разі пожежі.

5.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Для обмеження поширення та виявлення пожежі в разі її виникнення, система передбачає базові елементи протипожежного захисту. В технічному приміщенні встановлений оптичний протипожежний сповіщувач диму, який можна інтегрувати до системи сигналізації. Окрім цього присутній вільний доступ до вогнегасника порошкового типу з масою заряду не менше 2 кг.

Виходи з приміщення залишаються вільними для евакуації в разі пожежі відповідно до ДБН В.1.1-7:2016. При виникненні пожежі, за допомогою встановленого обладнання присутня можливість швидкого відключення системи, а електропроводка має підвищену вогнестійкість, що дозволяє уникнути поширення вогню по лінії живлення.

На вході до технічного приміщення планується встановлення пожежної таблички з вказівкою на категорію пожежної небезпеки, що відповідає НПАОП

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		78

40.1-1.32-01. Для профілактики загоряння заплановано проводити регулярні огляди стану приладів та чистоти повітропроводів.

У підсумку, запроваджені рішення відповідають сучасним вимогам щодо пожежної безпеки та забезпечують доволі ефективну профілактику та захист будівлі та людей у разі виникнення пожежі.

6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ

Для розуміння чи є економічно ефективним реалізовувати дану систему повітряного опалення приватного будинку необхідно скласти кошторис даного проєкту.

Таблиця 6.1 Кошторис проєкту

№ п/п	Назва обладнання	Од. вимір.	К-ть	Вартість одиниці, грн	Загальна вартість, грн
1	Датчик перепаду тиску PSW-200-PVC	шт.	3	1409	4227
2	Датчик температури повітря Belimo 22CT-14H	шт.	2	4450	8900
3	Сенсор температури повітря Belimo 22RT-19-1	шт.	4	3580	14320
4	Датчик температури води MBT 5250	шт.	1	5000	5000
5	Світловий індикатор B4BVB4EX	шт.	3	560	1680
6	ПЛК Phoenix contact ILC 151 ETH	шт.	1	16850	16850
7	Модуль аналогових входів IB IL AI 8/SF-PAC	шт.	2	30660	61320
8	Модуль аналогових виходів IB IL AO 4/8/U/BP-PAC	шт.	1	17760	17760
9	Модуль аналогових виходів IB IL AO 2/UI-PAC	шт.	1	7791	7791
10	Блок живлення ABLS1A24200	шт.	1	1554	8465
11	Автоматичний вимикач BA47-29 3P 16A	шт.	1	338	338

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		79

12	Вимикач навантаження Easy9 10A 4,5kA 1P	шт.	2	160	320
13	Електромагнітне реле RIDERSERIES 24B AC 12A	шт.	2	648	1296
14	Монтажна рейка DIN 35*7.5 мм PFTS35-F6B	м.	1.2	125.5	150.6
15	Кабель канал перфорований 25х40 ECS2540	м.	1.6	104	166.4
16	Силова клемма NSYTRV42BL	шт.	9	52	468
17	Прохідна клемма UT 1,5	шт.	56	21	1176
18	Щит ETI GT 40-60-30, IP66	шт.	1	8789	8789
19	Канальний вентилятор ВКП 2Е	шт.	2	14190	28380
20	Електропривід повітряної заслінки LM230ASR-TP	шт.	7	9100	63700
21	Електропривід кульового клапана LR230A	шт.	2	5755	11510
22	Провід живлення 4 мм ПВ1	м.	20	23	460
23	Провід 1.5 мм ПВ1	м.	80	9	720
24	Маркування для проводів ЕС-1 1.5-4.0	шт.	300	0.0437	13.11
25	Кабель силовий ВВГ 3х2.5	м.	40	44	1760
26	Кабель силовий ВВГ 4х2.5	м.	80	65	5200
27	Кабель контрольний КВВГ 3х1.5	м.	50	43	2150
28	Кабель контрольний КВВГ 4х1.5	м.	50	51	2550
29	Кабель контрольний КВВГ 5х1.5	м.	50	59	2950
30	Гофротруба d32 ПВХ	м.	270	20	5400
Сумарна ціна					283811

Тепер отримавши сумарну ціну усіх комплектуючих для створення системи автоматизації, можемо розрахувати додаткові одноразові витрати.

Вартість на проектування, розробку алгоритмів управління та програмування системи верхнього рівня:

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		80

$$V_{\text{пр}} = 283811 * 0.05 = 14190.55 \text{ грн}$$

Витрати на пакування та транспортування:

$$V_{\text{т}} = 283811 * 0.03 = 8514.33 \text{ грн}$$

Витрати на монтаж складових системи:

$$V_{\text{м}} = 283811 * 0.2 = 56762.2 \text{ грн}$$

Витрати на виконання пусконаладжувальних робіт:

$$V_{\text{пн}} = 283811 * 0.1 = 28381.1 \text{ грн}$$

Сумарна ціна усіх одноразових витрат:

$$\begin{aligned} \Delta K_{\text{авт}} &= 283811 + 14190.55 + 8514.33 + 56762.2 + 28381.1 = \\ &= 391659.18 \text{ грн} \end{aligned}$$

Тепер отримавши сумарну ціну усіх одноразових витрат для створення системи автоматизації, можемо розрахувати додаткові витрати на рік для обслуговування системи.

Додаткові витрати на електроенергію:

$$V_e = C_e * T * N = 4.32 * 3200 * 0.328 = 4534.272 \text{ грн/рік}$$

, де C_e - тариф на електроенергію, T - час роботи системи за рік, а значення N - сумарна потужність приладів.

Додаткові витрати на амортизаційні відрахування:

$$V_a = \Delta K_{\text{авт}} * 0.2 = 391659.18 * 0.2 = 78331.836 \text{ грн/рік}$$

Додаткові витрати ремонт і обслуговування системи:

$$V_p = \Delta K_{\text{авт}} * 0.5 = 391659.18 * 0.5 = 195829.59 \text{ грн/рік}$$

Додаткових витрат на зарплату персоналу немає, оскільки система встановлюється в приватний будинок, а робітники будуть визиватися лише для обслуговування, що вже було розраховано, тоді оцінка заробітної плати оцінюється в $V_z = 0 \text{ грн/рік}$

Сумарна ціна усіх додаткових витрат на рік:

$$\Delta B_{\text{авт}} = 4534.272 + 78331.836 + 195829.59 = 278695.698 \text{ грн/рік}$$

						ТА - 11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		81

За рахунок введення системи автоматизації опалення приватного будинку економія становить $E_k = 13000$ грн/рік за рахунок зменшення витрат на електроенергію.

Економія експлуатаційних витрат від введення автоматизації у дію:

$$\Delta U = E_k - \Delta B_{\text{авт}} = 13000 - 278695.698 = -265695.698 \text{ грн/рік}$$

Розрахуємо економічний ефект:

$$E_{\phi} = \Delta U - E_n * \Delta K_{\text{авт}} = -265695.698 - 0.15 * 391659.18 = -324444.575 \text{ грн/рік}$$

Тепер розрахуємо термін окупності:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K_{\text{авт}}}{\Delta U} = \frac{391659.18}{-265695.698} = -1.47 \text{ років}$$

Згідно розрахунків, можна сказати, що система не є економічно ефективною.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Пі д н.	Дата		82

ВИСНОВОК

Під час виконання бакалаврської роботи на тему “Автоматизована система повітряного опалення для приватного будинку” було розглянуто принципи роботи найпопулярніших видів опалення, проведено аналіз переваг та недоліків даних систем, а також розглянуто контури регулювання у даній системі. Окрім цього було проведено математичне моделювання температури приміщення за рахунок чого було отримано канали регулювання та збурення для ОК. На основі отриманої моделі було розраховано ПІ-регулятори за допомогою двох методів, а саме РАФХ та 20% з яких було обрано той, що краще підходить для регулювання температури в приміщенні, таким виявився ПІ-регулятор розрахований за методом РАФХ. Також було проведено розрахунок надійності контуру регулювання температури в приміщенні та визначено, що він є надійним.

За допомогою програмного середовища Codesys було створено функціональний блок для управління температурою в приміщенні, даний блок створений за допомогою мови програмування CFC. Також було розроблено SCADA-систему для зручного керування та відслідковування параметрів системи в режимі реального часу, реалізовано за допомогою програмного середовища Indusoft Web Studio.

Було розглянуто заходи з охорони праці для безпечного використання об’єкту та уникнення як аварійних ситуацій, так і травм серед обслуговуючого персоналу при обслуговуванні обладнання. Після усього цього було створено кошторис для впровадження даної системи автоматизації та розраховано його економічну ефективність, система виявилась економічно не ефективною, оскільки повітряна система опалення використовується для зручності опалення в приватному будинку, а не зменшення витрат на сам процес.

						ТА-11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		83

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Яке опалення вибрати для приватного будинку // Masterovoy. URL: <https://masterovoy.com.ua/blog/yake-opalennya-vibrati-dlya-privatnogo-budinku/> (date of access: 05.06.2025).
2. Паспорт виробу. Канальний водяний нагрівач ВЕНТС НКВ 400×200-2. – ВЕНТС, 2024. URL: <https://vents-shop.com.ua/images/companies/1/Prinadlezhn/nagrevat/pasport-vents-nkv-2024.pdf> (date of access: 05.06.2025).
3. Паспорт виробу. Канальний охолоджувач ВЕНТС ОКВ 400×200-3. – ВЕНТС, 2024. URL: <https://vents-shop.com.ua/images/companies/1/Prinadlezhn/okv/pasport-9114.pdf> (date of access: 05.06.2025).
4. Повітряне опалення будинку: як влаштувати та яке обладнання використовують // Pro-Otoplenie. URL: <https://pro-otoplenie.info/povitryane-opalennya-budynku-yak-vlashtuvaty-ta-yake-obladnannya-vykorystovuyut/> (date of access: 05.06.2025).
5. Боженко М. Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря будівель. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. 380 с.
6. Голінко І. М., Галицька І. Є. Промислове приміщення як динамічний елемент системи керування штучним мікрокліматом // Інформаційні системи, механіка та керування, 2018. № 3 (45). С. 104–114. – URL: <http://ismc.kpi.ua/article/view/124840> (date of access: 05.06.2025).
7. O'Dwyer A. Handbook of Pi and PID Controller Tuning Rules. 2nd Edition. London : Imperial College Press, 2006. 320 p.
8. Паспорт виробу. Контролер ILC 151 ETH. – Phoenix Contact, 2025. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/produkcija/controller-ilc-151-eth-2700974> (date of access: 05.06.2025).
9. Паспорт виробу. Кабельний датчик температури Belimo 22СТ-14Н 4-20 mA, зонд 50 мм. – Profimann, 2025. URL: <https://profimann.com.ua/uk/avtomatika-i-upravlenie/datchiki-temperatury/kabelnyy-datchik-temperatury-belimo-22ct-14h-4->

						ТА - 11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		84

[20-ma-zond-50-mm/](#) (date of access: 05.06.2025).

10. Паспорт виробу. Датчики температури MBT-5250. – UGOV, 2025. URL: <https://ugov.ua/ru/catalog/detail/mbt-5250-datchyky-temperatury/> (date of access: 05.06.2025).

11. Паспорт виробу. Пресостат PSW-200. – ТД Фаворит, 2025. URL: <https://tdfavorit.com.ua/ua/p756130165-pressostat-psw-200.html> (date of access: 05.06.2025).

12. Паспорт виробу. Регулятор температури Belimo 22RT-19-1. – Profimann, 2025. URL: <https://profimann.com.ua/uk/avtomatika-i-upravlenie/datchiki-temperature/regulyator-temperature-belimo-22rt-19-1/> (date of access: 05.06.2025).

13. Паспорт виробу. Привід для запірної арматури Belimo LR230A-2. – Belimo Україна, 2025. URL: <https://belimo.com.ua/shop/zaporno-reguliruyushhaya-armatura-s-elektroprivodami/privody-dlya-zapornoj-armatury/privody-sharovyx-klapanov/belimo-lr230a-2/> (date of access: 05.06.2025).

14. Паспорт виробу. Електропривід повітряної заслінки Belimo LM230ASR-TP. – Belimo Україна, 2025. URL: <https://belimo.com.ua/shop/privody-vozdushnyx-klapanov/privody-bez-vozvratnoj-pruzhiny/privody-bez-vozvratnoj-pruzhiny-lm/elektroprivod-vozdushnoj-zaslonki-belimo-lm230asr-tp/> (date of access: 05.06.2025).

15. Поліщук І. А., Баган Т. Г., Темчур В. С. Технологічні об'єкти керування / КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. — 126 с.

16. Методичні вказівки. Методичні вказівки з розробки розділу «Охорона праці» в дипломних проектах/роботах для студентів ТЕФ освітнього рівня «бакалавр» / уклад. С.Ф. Каштанов. – Київ: НТУУ «КПІ», 2020. – 23 с.

						ТА - 11394.0014.001.АТХ.П	Арк.
Зм.	Кільк.	Арк.	№ док.	Підп.	Дата		85