

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”  
Теплоенергетичний факультет  
Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів

«На правах рукопису»  
УДК 681.5.015.26

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_/ **Володимир ВОЛОЩУК**/  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

**Магістерська дисертація**  
на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою  
**“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології  
кібер-енергетичних систем”**  
зі спеціальності  
**151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані  
технології”**

на тему: Прецизійна система керування температурним режимом  
багатоцільового складу

**Виконав:** студент ІІ курсу, групи ТА-01мп  
Лігоцький Андрій Олексійович  
(прізвище ім’я, по батькові)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Науковий керівник** доцент, к.т.н. Голінко І. М.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

**Рецензент** Директор ТОВ «Тотал Енерго Трейд» Сайко М. П.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського”

Факультет Теплоенергетичний  
Кафедра Автоматизації теплоенергетичних процесів  
Рівень вищої освіти – другий(магістерський)  
Спеціальність 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”  
Освітньо-професійна програма (“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем”)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) /Володимир ВОЛОЩУК/  
(імя, ПРІЗВИЩЕ)  
“ “ \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Лігоцькому Андрію Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема дисертації Прецизійна система керування температурним режимом багатоцільового складу

науковий керівник дисертації Голінко Ігор Михайлович доц., к.т.н.

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

затверджені наказом по університету від «02» 11 2021 р. № 3629-с

2. Термін подання студентом дисертації «10» грудня 2021 р.

3. Об’єкт дослідження складське приміщення

4. Вихідні дані методи керування припливно-витяжною системою вентиляції керування електрокалорифером

5. Перелік завдань, які потрібно розробити систему автоматичного керування підтримання температури у складському приміщенні

програму керування електрокалорифером з ШІМ модуляцією для ПЛК  
Інформаційно аналітичну систему  
стартап-проект

6. Орієнтований перелік графічного (ілюстративного) матеріалу  
Зображення моделі об'єкту, перехідні процеси, зображення програмного  
керування, зображення інформаційно аналітичної системи

7. Орієнтований перелік публікацій  
Динамічна модель електрокалорифера для виробничого приміщення

8. Дата видачі завдання " 21 " вересня 2020 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації                | Строк виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|
| 1     | <i>Видача завдання</i>                                         | 21.09.2021                                      |          |
| 2     | <i>Огляд припливно-витяжної системи вентиляції повітря</i>     | 30.09.2021                                      |          |
| 3     | <i>Математичне моделювання динамічного режиму об'єкту</i>      | 7.10.2021                                       |          |
| 4     | <i>Апроксимація об'єкту керування</i>                          | 14.10.2021                                      |          |
| 5     | <i>Розрахунок системи регулювання з цифровим регулятором</i>   | 21.10.2021                                      |          |
| 6     | <i>Розрахунок системи регулювання з аналоговим регулятором</i> | 28.10.2021                                      |          |
| 7     | <i>Порівняння цифрової і аналогової системи регулювання</i>    | 4.11.2021                                       |          |
| 8     | <i>Розробка програмного керування</i>                          | 11.11.2021                                      |          |
| 9     | <i>Розробка інформаційно аналітичної системи</i>               | 18.11.2021                                      |          |
| 10    | <i>Розробка стартап-проекту</i>                                | 25.11.2021                                      |          |
| 11    | <i>Підпис керівника магістерської дисертації</i>               | 9.12.2021                                       |          |
| 12    | <i>Попередній захист магістерської дисертації</i>              | 10.12.2021                                      |          |
| 13    | <i>Захист</i>                                                  | 20.12.2021                                      |          |

Студент

Науковий керівник дисертації

Андрій ЛІГОЦЬКИЙ

(підпис)

(імя, ПРІЗВИЩЕ)

Ігор ГОЛІНКО

(підпис)

(імя, ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Вентиляція складу – це комплекс пристроїв і систем для організації якісного повітрообміну всередині приміщення, мета яких – забезпечити такі умови мікроклімату, які відповідають санітарно-гігієнічним і технологічним нормам.

Вентиляція складських приміщень націлена на створення оптимального середовища для збереження продукції і матеріальних цінностей, що знаходяться всередині. Дотримання якісних умов зберігання і термінів придатності продукції забезпечують за допомогою підбору обладнання, що забезпечує необхідну температуру, показники відносної вологості і руху повітряних мас.

Ключовою відмінністю складу від будь-яких інших приміщень є підвищений рівень захищеності та брак вільних площ. Збережена продукція, так само як і обладнання та стелажі перешкоджають вільній циркуляції повітря, через що нерідко виникають так звані «зони застою».

Магістерська дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, переліку використаних джерел. Дисертація складається з 56 рисунків, 32 таблиць та 95 сторінок.

Об'єктом дослідження є системи припливно-витяжної системи вентиляції.

Метою магістерської дисертації є створення сучасної прецизійної системи керування температурним режимом багатоцільового складу.

В ході роботи буд проведений вибір схем регулювання та їх обґрунтування, реалізовано контур керування температурним режимом приміщення, реалізований інформаційно аналітична система, розроблений стартап проєкт.

## **ABSTRACT**

Ventilation of the warehouse is a set of devices and systems for the organization of high-quality indoor air exchange, the purpose of which is to provide such microclimate conditions that meet sanitary-hygienic and technological standards.

Ventilation of warehouses is aimed at creating an optimal environment for the preservation of products and material values inside. Compliance with quality storage conditions and shelf life of products is ensured by selecting equipment that provides the required temperature, relative humidity and air movement.

The key difference between the warehouse and any other premises is the increased level of clutter and lack of free space. Preserved products, as well as equipment and shelves, impede the free circulation of air, which often leads to so-called "stagnation zones".

The master's dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, and a list of sources used. The dissertation consists of 56 figures, 32 tables and 95 pages.

The object of research is the supply and exhaust ventilation system.

The purpose of the master's dissertation is to create a modern precision temperature control system for multi-purpose composition.

In the course of work the choice of control schemes and their substantiation will be carried out, the contour of control of a temperature mode of the room is realized, the information-analytical system is realized, the startup project is developed.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....                                                                                                | 7  |
| ВСТУП .....                                                                                                                    | 8  |
| 1. ОГЛЯД ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПОВІТРЯ,<br>ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ .....                                      | 9  |
| 1.1.Класифікація систем вентиляції та огляд обладнання .....                                                                   | 9  |
| 1.2.Опис систем автоматизації.....                                                                                             | 15 |
| 1.2.1. Автоматизація існуючих контурів керування.....                                                                          | 15 |
| 1.2.2. Автоматизація вентиляційних систем .....                                                                                | 19 |
| 1.2.1. Автоматизація прецизійних та мультизональних систем<br>вентиляції .....                                                 | 23 |
| 1.3.Огляд математичних моделей припливно-витяжної системи.....                                                                 | 27 |
| 1.4.Опис характеристик припливно – витяжної системи вентиляції<br>ВУТР701ТНЭГЕСА18 .....                                       | 31 |
| 1.5.Постановка задачі автоматизації.....                                                                                       | 33 |
| 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ<br>ОБ'ЄКТУ .....                                                                 | 35 |
| 2.1.Структурна схема підтримання температурного режиму у складському<br>приміщенні.....                                        | 35 |
| 2.2.Динамічна модель складського приміщення .....                                                                              | 37 |
| 2.3.Моделювання перехідних характеристик динамічної моделі<br>підтримання температурного режиму у складському приміщенні.....  | 41 |
| 2.4.Апроксимація перехідних характеристик динамічної моделі<br>підтримання температурного режиму у складському приміщенні..... | 48 |
| 3. РОЗРАХУНОК ПРЕЦИЗІЙНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ<br>ПІДТРИМАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ БАГАТОЦІЛЬОВОГО<br>СКЛАДУ .....             | 53 |
| 3.1.Структурна схема регулювання підтримання температурного режиму<br>багатоцільового складу.....                              | 53 |
| 3.2.Розрахунок періоду дискретизації системи регулювання підтримання<br>температурного режиму багатоцільового складу .....     | 54 |
| 3.3.Розрахунок прецизійної системи регулювання підтримання<br>температурного режиму багатоцільового складу .....               | 56 |
| 3.3.1. Розрахунок цифрової системи регулювання з ШІМ модуляцією                                                                | 56 |
| 3.3.2. Розрахунок аналогової системи регулювання .....                                                                         | 58 |
| 3.3.3. Порівняння цифрової системи з ШІМ модуляцією і аналогової<br>системи регулювання.....                                   | 59 |

|                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.4. Порівняння перехідних процесів розширеної та апроксимованої моделі .....                                                               | 62        |
| 3.4.Розрахунок апроксимованої моделі прецизійної системи регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу на грубість ... | 65        |
| <b>4. РІШЕННЯ З АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРЕЦИЗІЙНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ БАГАТОЦІЛЬОВОГО СКЛАДУ .....</b>                          | <b>72</b> |
| 4.1.Технічні рішення з контролю та регулювання прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу .....             | 72        |
| 4.2.Реалізація програмного керування прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу .....                       | 74        |
| 4.3.Інформаційно аналітична система управління прецизійною системою підтримання температурного режиму багатоцільового складу .....            | 76        |
| <b>5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ .....</b>                                                                                                   | <b>79</b> |
| 5.1.Опис ідеї проєкту .....                                                                                                                   | 79        |
| 5.2.Технологічний аудит ідеї проєкту.....                                                                                                     | 80        |
| 5.3.Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....                                                                                  | 81        |
| 5.4.Розроблення ринкової стратегії проєкту .....                                                                                              | 87        |
| 5.5.Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту .....                                                                                  | 89        |
| <b>ВИСНОВОК.....</b>                                                                                                                          | <b>92</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>                                                                                                        | <b>94</b> |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПВСВ – припливно-витяжна система вентиляції;

АСК – автоматична система керування;

ОК – об'єкт керування;

ВМ – виконавчий механізм;

ПП – перехідний процес;

ПФ – передатна функція;

ПІ-регулятор – пропорційно-інтегральний регулятор;

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор;

ПЛК – програмно-логічний контролер;

ПЗ – програмне забезпечення;

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition.

HMI – Human Machine Interface.

## ВСТУП

Вентиляція складів – це комплекс пристроїв та систем для створення якісного повітря всередині приміщення, метою яких є забезпечення умов мікроклімату, що відповідають санітарно-гігієнічним вимогам.

За допомогою вентиляції в складських приміщеннях створюється оптимальне середовище для збереження продукції і матеріальних речей, що знаходяться всередині. Відповідність якості продукції вимогам ДСТУ забезпечується за рахунок підбору вентиляційного обладнання для своєчасного охолодження продуктів до необхідної температури та відносної вологості та переміщення повітряних мас в приміщенні.

Головною відмінністю складів від будь-яких інших приміщень є підвищений ступінь захищеності, а також нестача вільних площ. Через те, що збережена продукція запобігає вільному переміщенню повітря, у приміщенні виникає «зона застою».

У цій магістерській роботі представлена прецизійна система управління температурним режимом багатоцільового складу. Ця система дозволяє підтримувати різні значення температури окремих приміщеннях. Зручність такої системи полягає в тому, що вона створює окрему температурну зону для кожного приміщення, що дозволяє зберігати різні види товарів в одному приміщенні, а не різних. Різні температурні зони складу досягаються за допомогою електрокалорифера, який догріває припливне повітря.

# **1. ОГЛЯД ПРИПЛИВНО-ВИТЯЖНОЇ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПОВІТРЯ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ**

## **1.1. Класифікація систем вентиляції та огляд обладнання**

Процес вентиляції полягає у заміні відпрацьованого повітря свіжим зовнішнім повітрям. У разі потреби цей процес супроводжується обробкою зовнішнього повітря: підігрівом у зимовий сезон, охолодженням у літній сезон, зволоженням, осушенням та фільтрацією.

Вентиляція поділяється на два види:

- місцева;
- загального обміну;

Місцеві вентиляційні системи усувають шкідливі речовини у місці їх виникнення. У цьому випадку джерело шкідливих речовин закрито з усіх боків для запобігання подальшому розповсюдженню. Через те, що в цьому місці тиск менший за атмосферний, повітря відсмоктується за допомогою розрідження. Це дозволяє уникнути потрапляння до приміщення шкідливих речовин. При цьому місцева вентиляція досить ефективна і не потребує значних фінансових витрат, оскільки обсяг забрудненого повітря є порівняно невеликим.

У разі неможливості ізоляції місць із шкідливими речовинами застосовують вентиляцію загального обміну. Завдання даного типу вентиляції – очищення повітря з усіх приміщень виробництва, де він знаходиться. За допомогою очищення повітря відбувається видалення з нього пилу та бруду, а також надання йому певної вологості та тепла.

Існують такі види вентиляції:

- припливна вентиляція;
- витяжна вентиляція;
- припливно-витяжна вентиляція;

Щоб забезпечити виробництво чистим повітрям, припливна вентиляція подає свіже повітря в необхідних обсягах. Для цього у вентиляційних каналах

встановлюють вентилятори. За допомогою цих вентиляторів повітря у приміщенні нагнітається. У приміщенні при попаданні чистого повітря тиск повітря збільшується, а свіже повітря витісняє забруднене. За рахунок негерметичності повітря в приміщенні, він виходить через різні щілини та отвори. В результаті забруднене повітря виходить на вулицю або в сусідні приміщення.

Різниця між припливною та витяжною вентиляцією в тому, що витяжна вентиляція видаляє забруднене повітря за приміщення. При цьому, в приміщенні створюється розрідження і свіже повітря надходить туди через щілини, отвори або проходи і т.д. Для підприємств, де є велика кількість шкідливих речовин та вологи, видалення відпрацьованого повітря є ефективним способом вентиляції.

Витяжна вентиляційна система складається із витяжного вентилятора. На підприємствах з великою кількістю приміщень використовують вентиляційні канали, якими видаляється відпрацьоване повітря. У разі наявності шкідливих речовин, що утворюються у процесі виробництва, у витяжний вентиляційний канал встановлюють витяжний фільтр.

Припливно-витяжна система вентиляції має комбіновану систему, що складається з припливної та витяжної систем. Припливно-витяжна система вентиляції в приміщенні одночасно подає свіже повітря та видаляє відпрацьоване.

Повітряні потоки можуть поширюватися наступним чином:

- перемішуванням;
- витісненням;

На стелі або на спеціальних монтажних місцях встановлюються дифузори, які з великою швидкістю пропускають притяжний повітряний потік. При цьому повітря, яке потрапляє в приміщення, змішується з відпрацьованим та видаляється через дифузійні канали.

При витісненні чисте повітря потрапляє у приміщення через спеціальні пристрої, які з невеликою швидкістю примусово направляють повітря у приміщення. Ці пристрої розміщуються на підлозі. При цьому свіже повітря надходить у нижню частину приміщення, а відпрацьоване – піднімається вгору і видаляється через спеціально призначені вентиляційні отвори. Цей процес відбувається тому, що припливний повітряний потік має меншу температуру, ніж відпрацьований.

Існує кілька видів систем вентилявання: без рекуперації та рециркуляції, з рекуперацією та з рекуперацією. Рециркуляцію повітря в приміщеннях використовують тільки в тих випадках, коли дозволено використовувати повітря повторно. За допомогою рекуператорів можна віддати частину енергії повітря, що витягується, і не змішувати потоки у витяжному повітрі, але рекуператори досить дорогі. Найпоширенішими видами рекуператорів є пластинчасті та роторні.

Пластинчастий рекуператор рис. 1.1 – це теплообмінник із подвійними стінками, через які проходить тепле витяжне та холодне припливне повітря. Ці стінки мають високу теплопровідність. Встановлюються вони для того, щоб уникнути змішування теплих та холодних потоків повітря. При цьому пластинчастий рекуператор надійніший, ніж роторний: він не містить рухомих частин, а також не має електроустаткування.

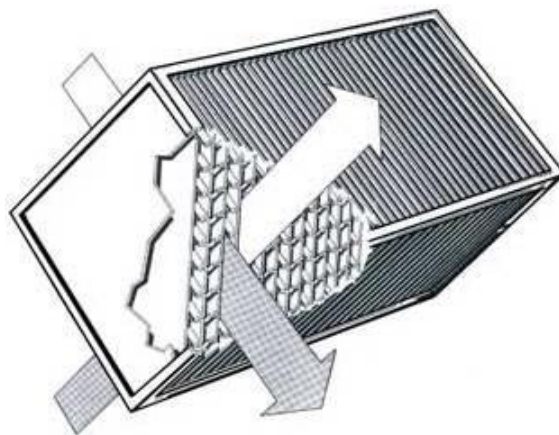


Рис. 1.1. Пластинчастий рекуператор

Роторний рекуператор рис. 1.2 відноситься до категорії регенеративних теплоутилізаторів, які являють собою ротор - теплонакопичувач, що повільно обертається, розташований перпендикулярно потокам припливного і витяжного повітря. Якщо в системі встановлено обігрів, то повітряний потік, що віддається, передає тепло в той сектор ротора, через який проходить. При обертанні він потрапляє в потік повітря і віддає йому тепло і сектор охолоджується. Роторний рекуператор має перевагу в тому, що може змінювати свою продуктивність. Для цього використовується частотний перетворювач та електродвигуни.

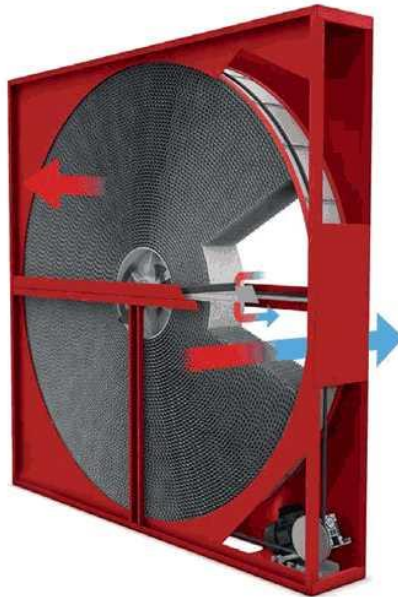


Рис. 1.2. Роторний рекуператор

Нагрів притяжного повітря можна проводити за допомогою ТЕН рис. 1.3 або за допомогою водяного нагрівача рис. 1.4, що бере воду для теплообміну з ГВП. Якщо необхідно обігріти велику кількість повітря, варто встановити водяний нагрівач. Якщо необхідно обігріти невелику кількість повітря або прогріти повітря для підтримки температурного режиму, використовують ТЕН. До переваг даного виду нагрівача можна віднести те, що його не потрібно підключати до систем ГВП та опалення. Для регулювання продуктивності

водяного нагрівача використовується клапан, що пропускає певну кількість теплоносія. При регулюванні продуктивності ТЕН, використовують ШІМ напівпровідникового реле.



Рис. 1.3. Електричний нагрівач повітря (ТЕН)

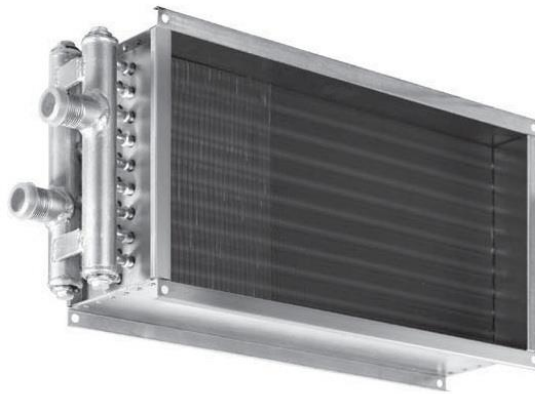


Рис. 1.4. Водяний нагрівник

Для охолодження повітря використовуються охолоджувачі. Серед найбільш поширених охолоджувачів можна виділити такі: охолоджувачі на основі ККБ рис. 1.5 та охолоджувачі на основі чилера рис 1.6. Недоліком охолодження на основі ККБ є те, що він працює в дискретному режимі, тому регулювання досить грубе. Чилери дозволяють охолодити велику кількість

повітря. Продуктивність охолоджувача на основі чилера регулюється за допомогою клапана, що пропускає певну величину охолоджувача.



Рис. 1.5. Компресорно-конденсаційний блок (ККБ)



Рис. 1.6. Вигляд чилера

Регулювати повітряний потік, можна за допомогою заслінок рис. 1.7 або вентиляторів рис. 1.8. Регулювання за допомогою заслінок здійснюється шляхом відкриття заслінок на певний кут. Регулювання за допомогою вентиляторів здійснюється зміною продуктивності вентиляторів за допомогою частотних перетворювачів.



Рис. 1.7. Вентиляційна заслінка



Рис. 1.8. Промисловий вентилятор

## **1.2. Опис систем автоматизації**

### **1.2.1. Автоматизація існуючих контурів керування**

Основними завданнями автоматизованих систем вентиляції є: підігрів притяжного повітря, охолодження притяжного повітря, підтримання

необхідної кількості повітря. Далі розглянемо наступні контури керування: контур керування нагрівачем повітря, контур керування охолодженням повітря, контур керування витратою повітря.

За допомогою триходового клапана поз. 1-3 рис. 1.9 регулюється водяний нагрівник. Завдяки регулюванню за допомогою триходового можна спростити роботу автоматики. Температура з датчика поз. 1-1 надходить на контролер поз. 1-2, а з контролера регулюючий сигнал надходить на триходовий клапан поз. 1-3, який змішує вхідний та зворотний теплоносій.

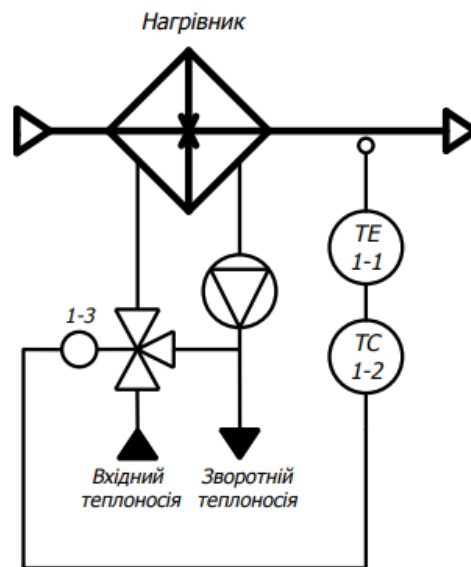


Рис. 1.9. Контур керування підігрівом повітря за допомогою водяного нагрівника

Для регулювання ТЕН використовують напівпровідникове реле поз. 1-3 рис. 1.10. До недоліків такого підходу для обігріву повітря можна віднести те, що за допомогою ТЕН не можна обігріти велику кількість повітря. Температура з датчика поз. 1-1 надходить до контролера, а з контролера – до напівпровідникового реле поз. 1-3, яке змінює продуктивність ТЕН.

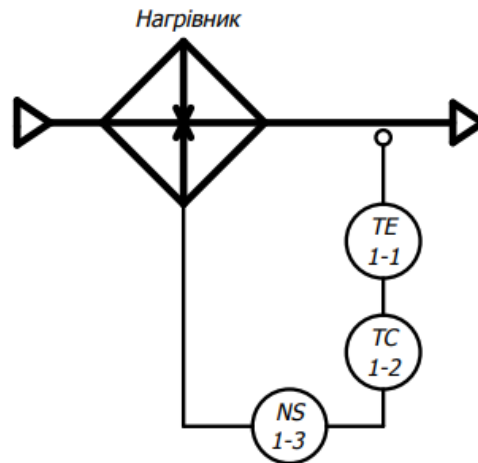


Рис. 1.10. Контур керування підігрівом повітря за допомогою ТЕН

Оглянемо з керуванням охолодження повітря рис. 1.11. За допомогою одноходового клапана поз 1-3 здійснюється керування в даному контурі. При цьому недолік керування одноходовим клапаном полягає у нелінійній витратній характеристиці, яку необхідно компенсувати. Температура з датчика поз. 1-1 поступає на контролер поз. 1-2 і з контролера сигнал регулювання поступає на одноходовий клапан поз. 1-3, який змінює витрату теплоносія.

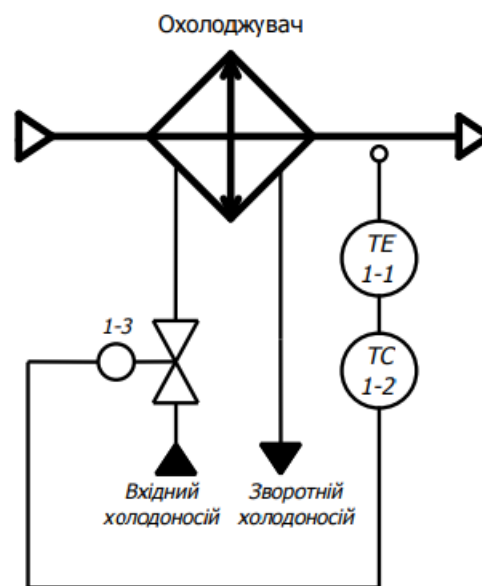


Рис. 1.11. Контур керування охолодженням повітря

Проаналізуємо контур керування витратою повітря. За допомогою зміни продуктивності вентилятора або за допомогою заслінки можна регулювати витрату повітря.

Продуктивність вентилятора регулюється за допомогою частотного перетворювача поз. 1-3 рис. 1.12. Цей спосіб керування більш витратний, ніж керування витратою за допомогою заслінки. Значення перепаду тиску з датчика поз. 1-1 надходить на контролер поз. 1-2, а з контролера сигнал регулювання надходить на частотний перетворювач поз. 1-3, змінюючи продуктивність вентилятора.

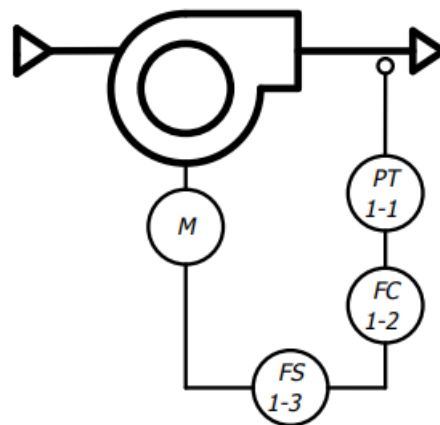


Рис. 1.12 Контур регулювання витрати за допомогою зміни продуктивності вентилятора

Зміну витрати можна здійснити за допомогою заслінки поз. 1-3 рис. 1.13, змінюючи її положення. Значення перепаду тиску з датчика поз. 1-1 поступає до контролера поз. 1-2 і з контролера сигнал регулювання поступає на заслінки поз. 1-3, які змінюють своє положення, змінюючи кількість повітря яке надходить у вентиляційний канал.

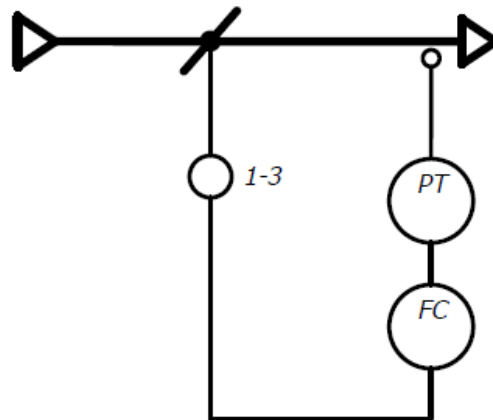


Рис. 1.13. Контур регулювання витрати за допомогою заслінки.

### 1.2.2. Автоматизація вентиляційних систем

Проаналізуємо деякі системи вентиляцій, які найпоширеніші: припливна система вентиляції, припливно-витяжна система вентиляції, припливно-витяжна система вентиляції з рекуперацією. Припливна система вентиляції забезпечує лише надходженням свіжого підготовленого повітря ззовні. У цій системі є витяжна заслінка, притяжний фільтр, водяний нагрівач і притяжний вентилятор рис.1.14. А тепер детальніше розглянемо системи.

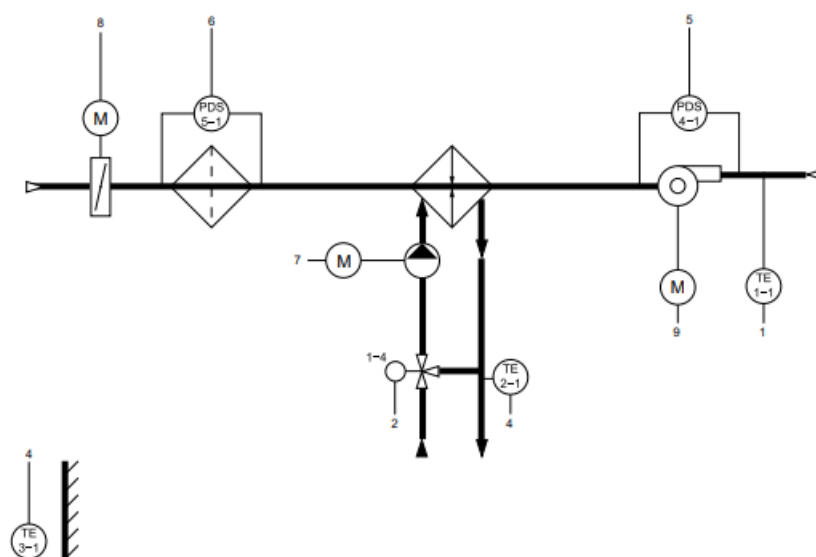


Рис. 1.14. Технологічна схема припливної системи вентиляції

Заслінка має протипожежну функцію, тому не дозволяє проникати всередину приміщення повітря ззовні, коли вона закрита. Фільтри в припливному каналі призначені для запобігання попаданню пилу, бруду та інших забруднень з вулиці та захищають обладнання вентиляційної системи. Як індикатор забруднення фільтра використовується пресостат. Припливний вентилятор – це невід'ємна частина каналу припливу системи вентиляції. Для того щоб повисити температуру притяжного повітря, використовується водяний нагрівач. Гаряча вода, яка надходить у систему опалення, є теплоносієм для водяного нагрівача. Нагрівач – це водяний теплообмінник, який передає теплоту від гарячої води до повітряного потоку. Щоб уникнути замерзання нагрівача, використовується спеціальний термостат. За допомогою триходового клапана регулюється продуктивність нагрівача. Триходовий клапан змішує вихідний потік із системи гарячого водопостачання та зворотний потік від нагрівача. Циркуляційний насос використовується для циркуляції теплоносія. Датчик зворотної температури теплоносія необхідний для підтримки необхідної температури зворотного теплоносія, що повертається до мережі гарячого водопостачання. Припливний вентилятор забезпечує надходження повітря ззовні. За допомогою пресостату можна визначити, чи працює притяжний вентилятор, чи ні. Завдяки цьому пресостат відстежує аварію притяжного вентилятора. Температура повітря вимірюється датчиком температури.

Одним із важливих параметрів є температура повітря на вулиці. Вимірювання здійснюється за допомогою зовнішнього датчика температури. У приміщенні підтримується необхідна температура незалежно від температури зовні. Також знання про температуру надворі дозволяють заощадити електроенергію, яка потрібна у процесі підтримки заданої температури. Режим роботи системи залежить від температури зовнішнього

повітря. При різній температурі зовні використовуватимуться різні режими роботи.

Для того щоб забезпечити надходження та видалення відпрацьованого повітря, в приміщенні встановлюється припливно-витяжна система вентиляції рис. 1.15. У цій системі є також притяжний канал, як і в притяжній системі, але з додаванням охолоджувача. При цьому витяжний канал має у своєму складі витяжний фільтр та витяжну заслінку, а також витяжний вентилятор. Тепер розглянемо елементи системи, відмінні від попередньої.

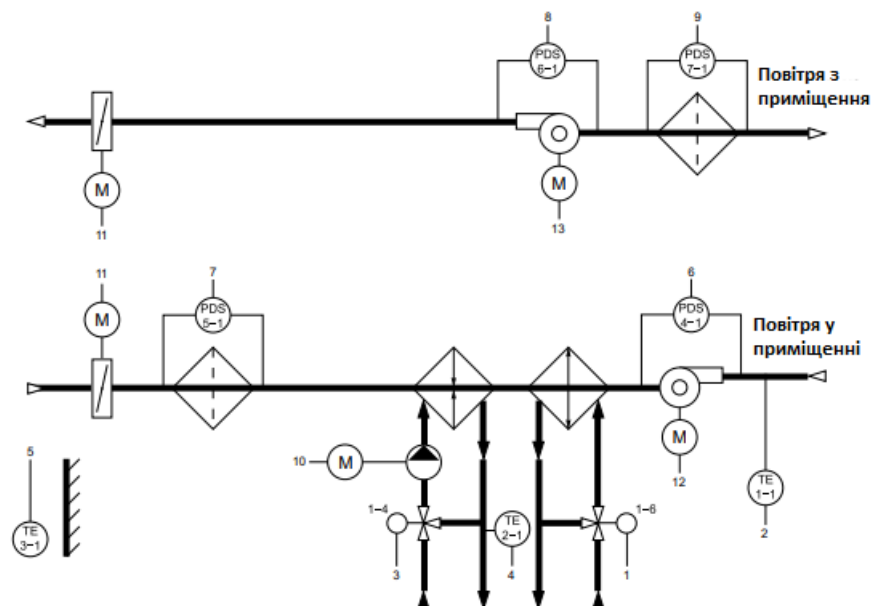


Рис. 1.15. Технологічна схема припливно-витяжної системи вентиляції

Притяжне повітря охолоджується охолоджувачем. Охолоджувач – це пристрій передачі холоду від холодоносія до притяжного повітря. Триходовий клапан дозволяє регулювати продуктивність охолоджувача.

У витяжному каналі знаходиться: фільтр, витяжний вентилятор та заслінка. Щоб уникнути забруднення витяжного вентилятора та рекуператора, встановлюють витяжний фільтр. Видалення відпрацьованого повітря із приміщень відбувається за допомогою витяжного вентилятора.

Вентиляційні системи з рекуперацією забезпечують надходження та видалення відпрацьованого повітря в приміщення, а також теплообмін між витяжним та притяжним потік повітря рис. 1.16. Крім цього, у цій системі є такі ж елементи, як і у попередньої, крім рекуператора. Розглянемо рекуператор, як елемент системи.

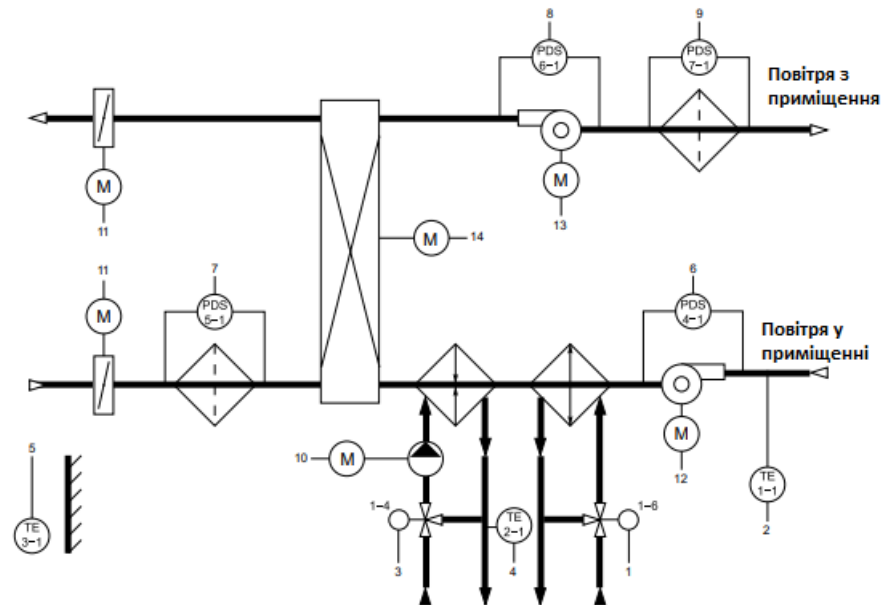


Рис. 1.16. Припливно-витяжна система вентиляції з рекуперацією

Рекуперація тепла дозволяє проводити обмін теплом між витяжним та припливним повітрям, не змішуючи потоки, що заощаджує енергію, необхідну для досягнення необхідної температури. У системі наявний роторний рекуператор. З допомогою зміни швидкості обертання роторного рекуператора можна регулювати його продуктивність. Для цього використовується двигун та частотний перетворювач.

### **1.2.1. Автоматизація прецизійних та мультизональних систем вентиляції**

У прецизійних системах використовують для підтримання температури у при приміщенні використовують каскадні системи регулювання та системи за доводчиками температури.

За допомогою каскадних систем [5] стабілізації забезпечується висока якість регулювання. Ці системи регулювання регулюються двома регуляторами, які контролюють основний регульований параметр і впливають не на регульований орган об'єкта, як у звичайних системах, а на задатчик допоміжного регулятора. Цей регулятор підтримує на певному рівні деяку допоміжну величину проміжної точки об'єкта регулювання. Перший контур називається стабілізуючим, другий коригуючим.

Схема каскадної системи стабілізації безперервної дії для системи кондиціонування із рециркуляцією показано на рис. 1.17. Стабілізація параметрів повітря здійснюється за допомогою двох каскадних систем. Перша система забезпечує стабілізацію температури повітря після повітропідігрівача другого ступеня з корекцією за температурою повітря в об'єкті регулювання (приміщенні) шляхом зміни витрати теплоносія в повітропідігрівачі (регулятор P2). Коригуюча дія здійснюється за допомогою коригувального регулятора P2. До другої системи стабілізації входить чутливий елемент температури точки роси, встановлений після камери зрошення, регулятор P1, керуючий послідовно виконавчими механізмами змішувально-регулюючого клапана 1, повітропідігрівача першого ступеня ВН1 і змішувально-регулюючих повітряних клапанів зовнішнього та рециркуляційного повітря 2. Коригуючий вплив на здійснюється за допомогою регулятора вологості P1, датчик якого встановлений у приміщенні.

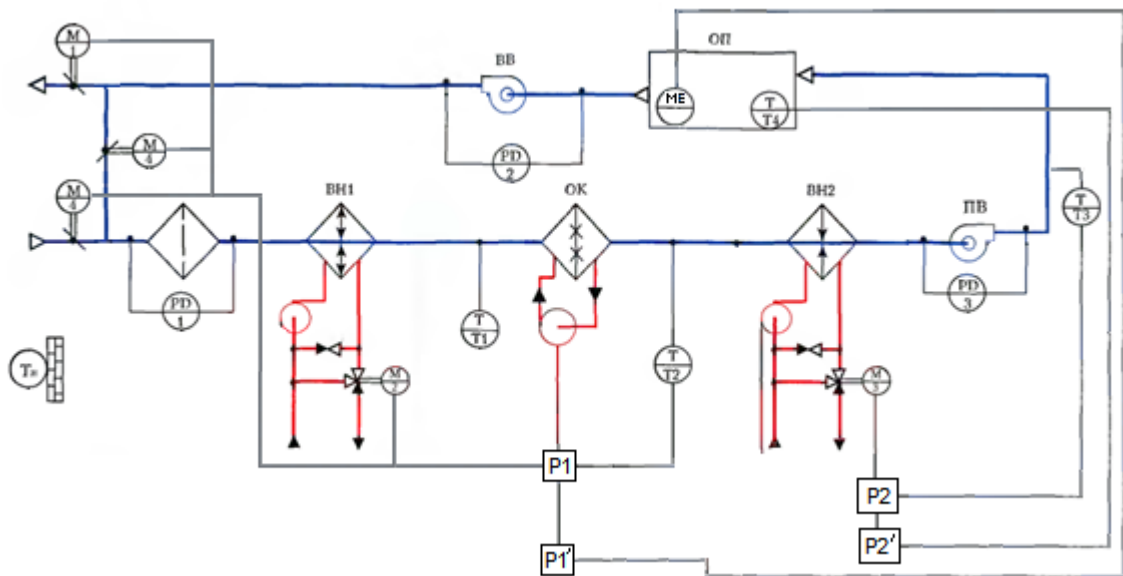


Рис. 1.17. Схема каскадної системи керування системою кондиціонування

Системи вентиляції з доводчиками температури [4] як правило використовуються у багатозональних системах вентиляції та кондиціонування рис. 1.18. У даній багатозональній вентиляційній кондиціонування використовується загальна підготовка повітря та місцеві доводчики температури. Завдяки доводчикам температури у приміщеннях підтримується задана температура.

У цій системі доводчик температури та датчик температури у приміщенні утворюють окремий контур керування. З датчика температури ТЕ значення температури поступають до регулятора, який у свою чергу керує клапаном 8, змінюючи продуктивність нагрівача 7.

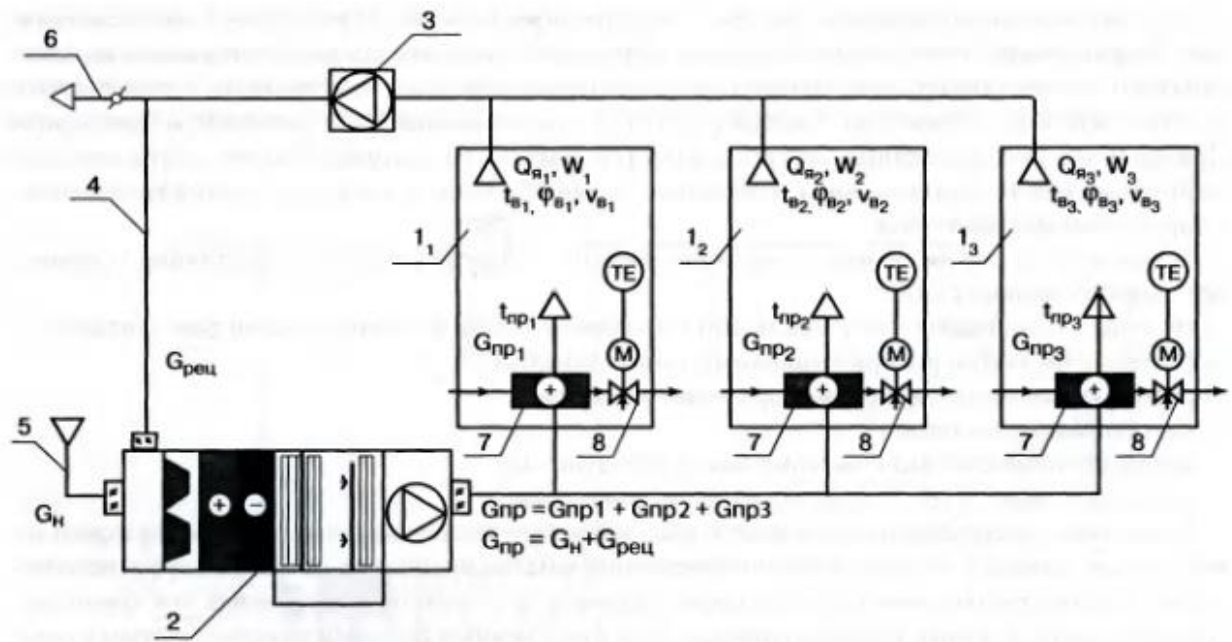


Рис. 1.18. Схема багатозональної системи кондиціонування з температурними доводчиками

В системах вентиляції та кондиціонування використовують кількісне та якісне регулювання [3]. Необхідна якість повітря досягається при зміні обсягу повітря в процесі його безперервного руху, що відбувається при кількісному регулюванні. Кількісне регулювання застосовується у багатозональних системах, а однозональних — якісне. Обидва методи можна використовувати для отримання оптимальних параметрів.

Кількісне регулювання передбачає зміну витрати припливного повітря. Перед подачею до приміщення проводиться попередня підготовка повітря. Потім повітря подається до приміщення для асимілювання тепла та вологи. При цьому в кожне приміщення подається різна кількість повітря, що змінюється системою автоматичного регулювання рис. 1.19.

При цьому необхідно керувати входними та вихідними заслінками у всіх приміщеннях, незалежно від стану заслінок в інших приміщеннях, причому припливні та витяжні заслінки повинні керуватися синхронно. Потрібно також керувати швидкістю вентиляторів, триходовими клапанами, водяним насосом

і т.д., а також забезпечити захист водяних калориферів від замерзання, двигунів вентиляторів від перегріву або займання. У центральному (загальному) каналі повітря нагрівається або охолоджується до певної температури і потім надходить у приміщення. Датчик температури встановлений у кожному приміщенні. Залежно від різниці між уставкою температури в приміщенні і реальною температурою, виміряною датчиком, контролер повинен встановлювати в необхідне положення входні та вихідні заслінки, змінюючи цим витрату повітря, що проходить через кожне приміщення.

Якщо всі заслінки закриються, тиск у загальному каналі при постійній продуктивності вентиляторів зростає, що призведе не тільки до неприпустимого збільшення швидкості потоку повітря через інші заслінки, але і до появи акустичного шуму (свисту). Для виключення такої ситуації у загальних припливних та витяжних каналах встановили датчик динамічного тиску. За допомогою сигналів з цих датчиків змінюється швидкість обертання вентилятора, завдяки чому тиск усередині каналу залишається постійним і, отже, швидкість потоку повітря крізь будь-яку кількість відкритих в даний момент заслінок залишається незмінною.

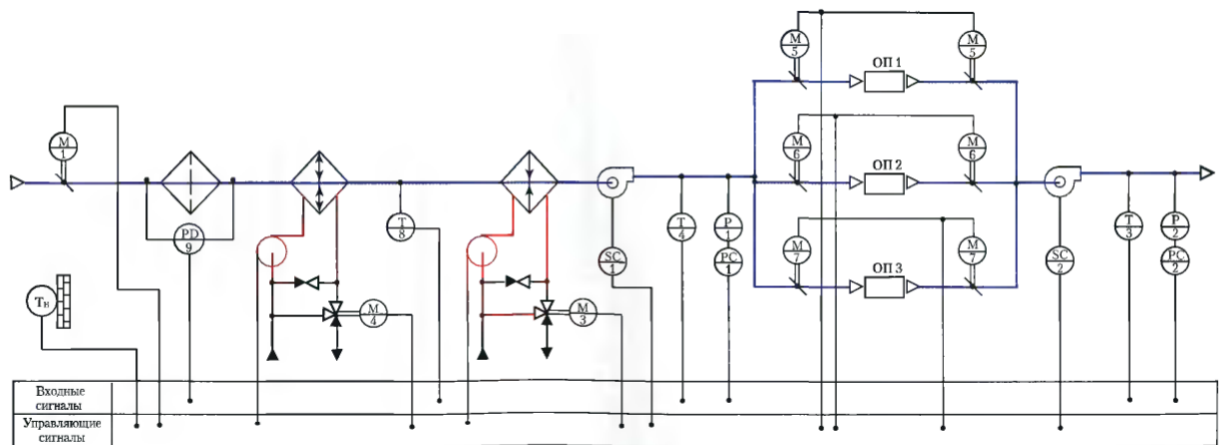


Рис. 1.19. Багатозональна система кондиціонування.

Отже, з розглянутих систем автоматизації вентиляційних систем для багатозональних прецизійних систем вентиляції доцільно використовувати

систему вентиляції з загальною підготовкою повітря та доводчиками температури для кожної зони. Дана система буде точно підтримувати задану температуру у відповідній зоні та забезпечить необхідну якість повітря.

### 1.3. Огляд математичних моделей припливно-витяжної системи

Розглянемо основні математичні моделі найбільш уживаних елементів у припливно-витяжній системі вентиляції: електрокалорифер та приміщення. Для моделі електрокалорифера є такі спрощення: відсутній теплообмін з навколишнім середовищем, а також у цієї моделі є тільки два динамічні елементи (повітря та елемент ТЕН) із зосередженими параметрами, вибрані середні значення матеріальних потоків поверхні для робочого діапазону апарату. Для приміщення наявні наступні спрощення: у приміщенні відсутнє виділення вологи.

Схема електрокалорифера [1] з матеріальними потоками показана на рисунку 1.20. Нагрів притяжного повітря у електрокалорифері відбувається за допомогою елементів ТЕН, які під'єднанні до живлення через напівпровідникове реле. Напівпровідникове реле змінює потужність  $N_E(t)$ , ТЕНи нагріваються до температури  $\theta_E(t)$ . Уся електрична потужність використовується для обігріву повітря. До електрокалорифера надходить повітря з витратою  $G_A(t)$ . Вхідне повітря надходить з температурою  $\theta_{A0}(t)$ , вихідне повітря з температурою  $\theta_A(t)$ . Електрокалорифер має наступні розміри:  $L$  – глибина,  $C$  – ширина і  $H$  – висота.

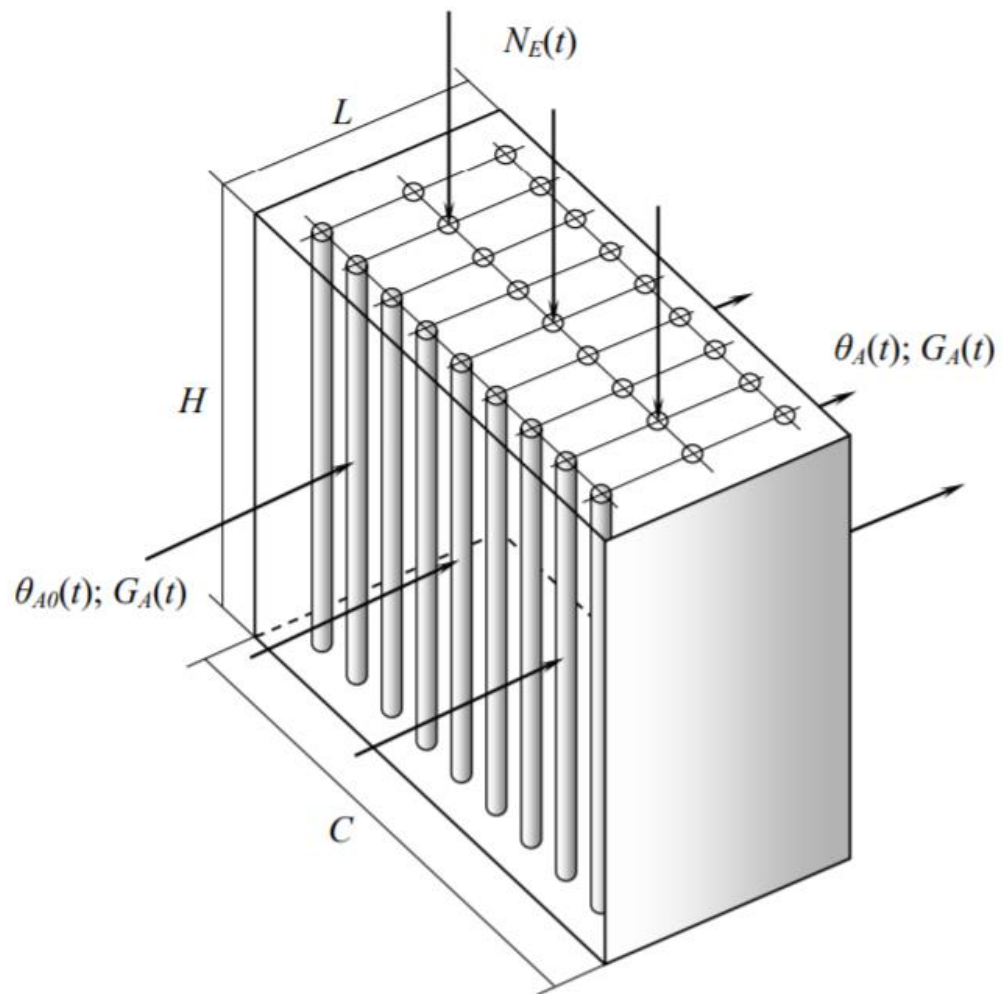


Рис. 1.20. Схема калорифера з вхідними і вихідними матеріальними потоками

Спрощена модель електрокалорифера за каналом регулювання описується аперіодичною ланкою другого порядку:

$$W_{\text{к.р.}}(p) = \frac{b_4}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (1.1)$$

Спрощена модель електрокалорифера за каналом збурення описується аперіодичною ланкою другого порядку:

$$W_{\text{к.зб.}}(p) = \frac{b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (1.2)$$

У формулах 1.1 – 1.2 наявні коефіцієнти, які описуються наступними виразами:  $a_2 = \frac{T_E T_A}{1 - k_1 k_2}$ ,  $a_1 = \frac{T_E + T_A}{1 - k_1 k_2}$ ,  $b_0 = \frac{k_3}{1 - k_1 k_2}$ ,  $b_1 = \frac{k_3 T_E}{1 - k_1 k_2}$ ,  $b_2 = \frac{k_4}{1 - k_1 k_2}$ ,  $b_3 = \frac{k_4 T_E}{1 - k_1 k_2}$ ,  $b_4 = \frac{k_0 k_2}{1 - k_1 k_2}$ .

Схема приміщення [2] з матеріальними потоками показана на рисунку 1.21. Приміщення має наступний об'єм  $V_A = H \cdot L \cdot C$ . Із системи припливної вентиляції поступає повітря, яке має температурою  $\theta_{A0}(t)$ , з повітряним потоком  $G_A(t)$ . У приміщенні відбувається теплообмін між устаткуванням з потужністю  $N_E$  та стінками приміщення, які мають температурою  $\theta_S$ . Повітря у приміщенні має наступну температуру  $\theta_A(t)$ . Температура повітря зовні  $\theta_N(t)$ .

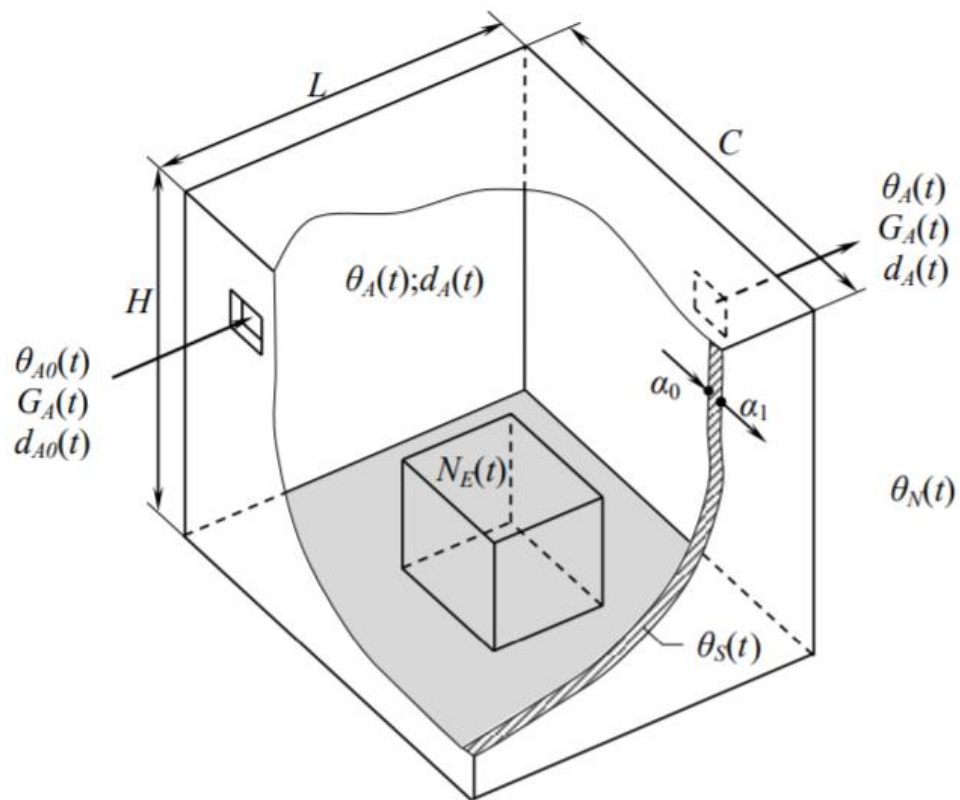


Рис. 1.21. Схема приміщення з вхідними і вихідними матеріальними потоками

Спрощена модель приміщення за каналом регулювання описується аперіодичною ланкою другого порядку:

$$W_{п.р.}(p) = \frac{b_1 p + b_0}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (1.3)$$

Спрощена модель приміщення за каналом збурення від людей та устаткування описується аперіодичною ланкою другого порядку:

$$W_{п.зб.вн.}(p) = \frac{b_5 p + b_4}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (1.4)$$

Спрощена модель приміщення за каналом збурення від зміни температури ззовні описується аперіодичною ланкою другого порядку:

$$W_{п.зб.зв.}(p) = \frac{b_6}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (1.5)$$

У формулах 1.3 – 1.5 наявні коефіцієнти, які описуються наступними виразами:  $a_1 = \frac{T_A + T_S}{1 - k_2 k_4}$ ,  $a_2 = \frac{T_A T_S}{1 - k_2 k_4}$ ,  $b_0 = \frac{k_0}{1 - k_2 k_4}$ ,  $b_1 = \frac{k_0 T_S}{1 - k_2 k_4}$ ,  $b_2 = \frac{k_1}{1 - k_2 k_4}$ ,  $b_3 = \frac{k_1 T_S}{1 - k_2 k_4}$ ,  $b_4 = \frac{k_3}{1 - k_2 k_4}$ ,  $b_5 = \frac{k_3 T_S}{1 - k_2 k_4}$ ,  $b_6 = \frac{k_2 k_5}{1 - k_2 k_4}$ .

На схемі приміщення [3] рисунок 1.22 виділені зовнішні збурюючі впливи (теплова  $Q_n$ , вологісна  $W_n$  і аеродинамічне  $G_n$  навантаження) і внутрішні (теплова  $Q_{п.}$ , вологісна  $W_{п.}$  і газова  $C_{п.}$  навантаження). Вхідними параметрами є: температура  $t_{пр.}$ , вологість  $d_{пр.}$  і витрата повітря, що подається в приміщення  $G_{пр.}$ , і відповідно регульованими:  $t_{п.}$ ,  $d_{п.}$  і  $C_{п.}$ .

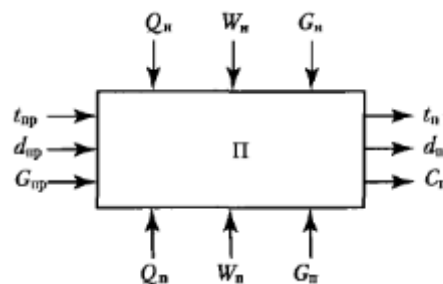


Рис. 1.22. Схема приміщення

Динамічні властивості приміщення залежать від кратності повітрообміну  $K_v$ , узагальненого розміру приміщення  $l_v$  (відношення об'єму приміщення  $V_{п.}$  до площі поверхні огороження  $F$ ), коефіцієнтів теплопередачі

огородження  $K_{ог}$  і постійного часу огорожі  $T_{ог}$ . Аналітично передаточна функція каналу температури має вигляд:

$$W_{п.}(p) = \frac{T_{ог} \cdot p + 1}{T_{п} \cdot p + 1} \cdot K_{п}, \quad (1.6)$$

де  $K_{п}$  та  $T_{ог}$  визначаються по показникам  $K_{в}$ ,  $l_v$ ,  $K_{ог}$ , теплопровідності  $c_v$  та щільністю  $\rho_v$  повітря.  $T_{п}$  – постійна часу приміщення, визначається як  $T_{п} \approx K_{в}^{-1}$ .

Враховуючи, що для приміщень характерні періоди зміни складових теплового навантаження від кількох хвилин до годин, з такими періодами коливань нехтують інерційністю огородження, тому приміщення описується аперіодичною ланкою першого порядку з передатною функцією:

$$W_{п.}(p) = \frac{K_{п}}{T_{п} \cdot p + 1} \quad (1.7)$$

#### 1.4. Опис характеристик припливно – витяжної системи вентиляції ВУТР701ТНЭГЕСА18

Розглянемо установку VENTS ВУТР701ТНЭГЕСА18 рис. 1.23.

Припливно-витяжна установка серій ВУТ Р701ТНЭГЕСА18 – це повністю готовий вентиляційний апарат, який фільтрує та забезпечує подачею у приміщення свіжого повітря без домішок. Використовуючи пластинчастий рекуператор та електрокалорифер з охолоджувачем, система вентиляції забезпечує приміщення чистим повітрям та комфортними умовами.



Рис. 1.23. Установка VENTS ВУТР701ТНЭГЕСА18

Основні технічні характеристики припливно-витяжної установки VENTS ВУТР701ТНЭГЕСА18 наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Основні характеристики вентиляційної установки VENTS ВУТР701ТНЭГЕСА18

| Параметр                             | Величина           |
|--------------------------------------|--------------------|
| Витрата повітря, м <sup>3</sup> /год | 1850               |
| Тип нагрівача                        | електричний        |
| Діапазон температур                  | від -10°C до +40°C |
| Фільтр                               | G4(F7)             |
| Діаметр повітропроводів              | 500 мм             |
| Споживана потужність                 | 5 кВт              |
| Частота обертання, об. / хв          | 2700               |
| Вага, кг                             | 160                |
| Напруга живлення, В                  | 3/380/50           |
| Рівень шуму, дБ (А)                  | 52                 |
| Ефективність рекуперації,%           | 85                 |
| Тип рекуператора                     | Пластинчастий      |
| Габарити, мм                         | 748/750/1667       |

У установці VENTS ВУТР701ТНЭГЕСА18 наявний електрокалорифер НК 400х200-4,5-3. Основні технічні характеристики електрокалорифера НК 400х200-4,5-3 наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Характеристики електрокалорифера НК 400x200-4,5-3

| Параметр                                        | Величина |
|-------------------------------------------------|----------|
| Мінімальна витрата повітря, м <sup>3</sup> /год | 330      |
| Сила струму, А                                  | 6,6      |
| Напруга, В                                      | 380      |
| Потужність, кВт                                 | 4,5      |
| Маса, кг                                        | 6,5      |

### 1.5. Постановка задачі автоматизації

Виходячи з розглянутих існуючих систем, а також розглянутих контурів управління виберемо найвідповідніші рішення для прецизійної системи підтримки температурного режиму багатоцільового складу. Використовуємо для регулювання потоку повітря контур із змінною продуктивністю вентиляторів. Щоб забезпечити необхідну температуру притяжного повітря, використовується контур для підігріву повітря з водяним нагрівачем та триходовим клапаном, для контуру охолодження повітря – одноходовий клапан та теплообмінник. Для того щоб забезпечити необхідну температуру в приміщенні, використовуємо контур з обігріву повітря з електричним нагрівальним елементом та напівпровідниковим реле. На основі підібраних варіантів можна сформулювати вимоги до створення прецизійної системи підтримки температурного режиму багатоцільового складу.

Для реалізації проекту необхідно:

- проаналізувати існуючі способи прецизійного керування температурою у приміщенні;
- розробити динамічну модель електрокалорифера для приміщення та апроксимувати її;

- розрахувати налаштування інтелектуального регулятора температури у приміщенні;
- створити програмне забезпечення системи керування, що реалізується на контролері;
- розробити людино-машинний інтерфейс з елементами MES системи для системи керування;

## 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ ОБ'ЄКТУ

### 2.1. Структурна схема підтримання температурного режиму у складському приміщенні

Розглянемо функціональну схему прецизійного керування температурою у складському приміщенні рис. 2.1.

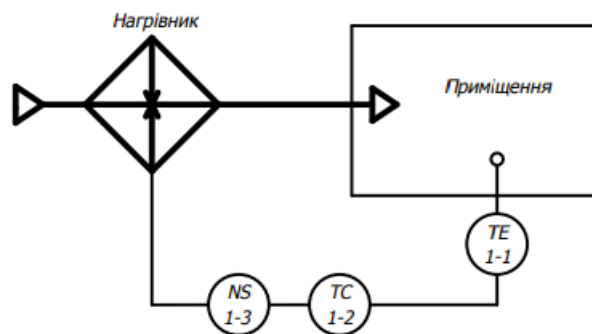


Рис. 2.1. Схема керування підтриманням температурного режиму у складському приміщенні

Схема керування підтримання температурного режиму у складському приміщенні рис. 2.1 включає датчик температури приміщення поз. 1-1, контролер поз 1-2, напівпровідникового реле поз 1-3 та електрокалорифер, який виконує роль регулюючого органу даного контуру керування. Потужність електрокалорифера змінюється за допомогою напівпровідникового реле. З датчика температури у приміщенні значення температури надходить до контролера, який виробляє керуючий сигнал. Далі, керуючий сигнал надходить на напівпровідникове реле, яке впливає на зміну потужності електрокалорифера.

З рисунку 2.1 видно, що об'єктом керування є: приміщення, датчик температури, електрокалорифер та повітропровід. На приміщення та електрокалорифер впливають: регулююча дія та збурення. На основі цього на

рис. 2.2 наведена розгорнута структурна схема підтримання температури у складському приміщенні.

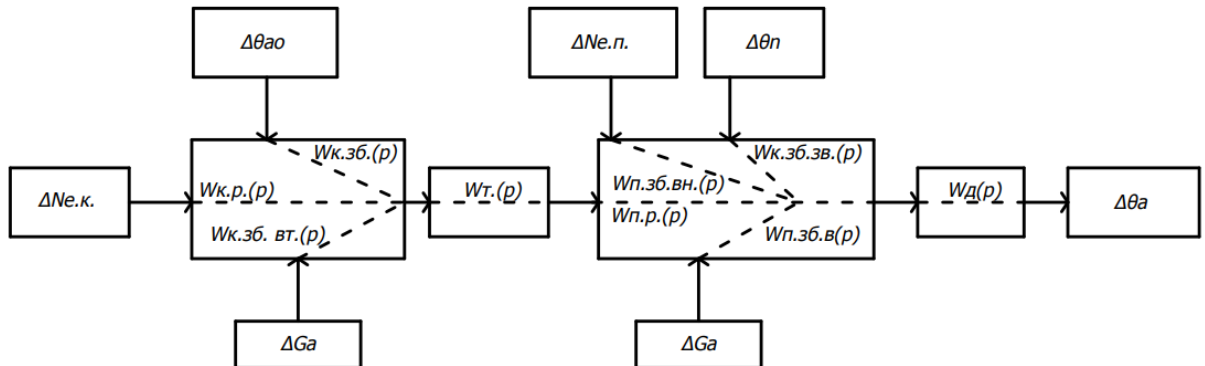


Рис. 2.2. Розгорнута структурна схема підтримання температурного режиму у складському приміщенні

Опираючись на рис. 2.2 видно, що на приміщення діють наступні збурення: зміна кількості людей  $N_{e.n}$ , зміна зовнішньої температури  $\theta_n$  та зміна витрати повітря  $G_A$ . На електрокалорифер діють наступні збурення: зміна вхідної температури  $\theta_{A0}$  та зміна витрати повітря  $G_A$ . У даному випадку витрата повітря  $G_A$  є сталою величиною, бо приміщення промислове. Транспортне запізнення, яке вносить повітропровід приймемо 5 секунд. Виходячи з цього спрощена структура об'єкту керування наведена на рис. 2.3.

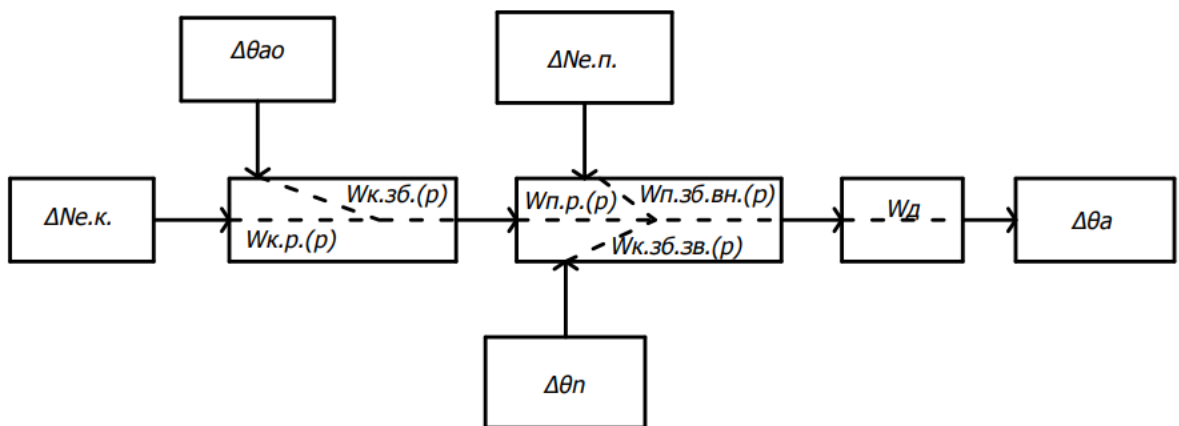


Рис. 2.3. Спрощена структурна схема підтримання температурного режиму у складському приміщенні

У наведеній системі наявний датчик температури, який має свої динамічні властивості. Використовується датчик температури типу NTC. Такий датчик відповідає аперіодичній ланці без запізнення. Датчик передає значення про повну зміну температури за 140 секунд. Передатна функція датчика температури має вигляд:

$$W_d(p) = \frac{1}{35p+1} \quad (2.1)$$

Виходячи з структурної схеми 2.3 буде використовуватися сумісна модель електрокалорифера та виробничого приміщення.

## 2.2. Динамічна модель складського приміщення

З структурної схеми 2.3 видно, що зміна потужності електрокалорифера та збурення, які діють на нього, безпосередньо впливають на зміну температури у приміщення. Тобто можна розглядати електрокалорифер та приміщення як один об'єкт.

Для розробки динамічної моделі електрокалорифера [6] для системи складських приміщень зробимо наступні спрощення: відсутній теплообміну з навколишнім середовищем, у приміщенні відсутнє вологовиділення, властивості матеріальних потоків поверхні теплообміну електрокалорифера обрані усередненими для робочого діапазону електрокалорифера.

Схема електрокалорифера та виробничого приміщення з вхідними і вихідними матеріальними потоками наведена на рисунку 2.4. Нагрівання притяжного повітря у електричному калорифері відбувається за допомогою ТЕН, які живляться через напівпровідникове реле. Напівпровідникове реле змінює електричну потужність  $N_E(t)$ , ТЕНи нагріваються до температури  $\theta_E(t)$ . Будемо вважати, що вся електрична потужність використовується для нагріву повітря. До калорифера надходить повітря з витратою  $G_A(t)$ . Вхідне

повітря має температуру  $\theta_{A0}(t)$ . Калорифер має такі розміри:  $L$  – глибина,  $C$  – ширина і  $H$  – висота. Приміщення має об'єм  $V_A = H_1 \cdot L_1 \cdot C_1$ . Від електрокалорифера через повітропровід надходить повітря з температурою  $\theta_{A2}(t)$ . У кімнаті наявний теплообмін між обладнанням з потужністю  $N_{E1}(t)$  та стінами з температурою  $\theta_S$ . Температура повітря у приміщенні  $\theta_A(t)$ . Температура ззовні становить  $\theta_N(t)$ .

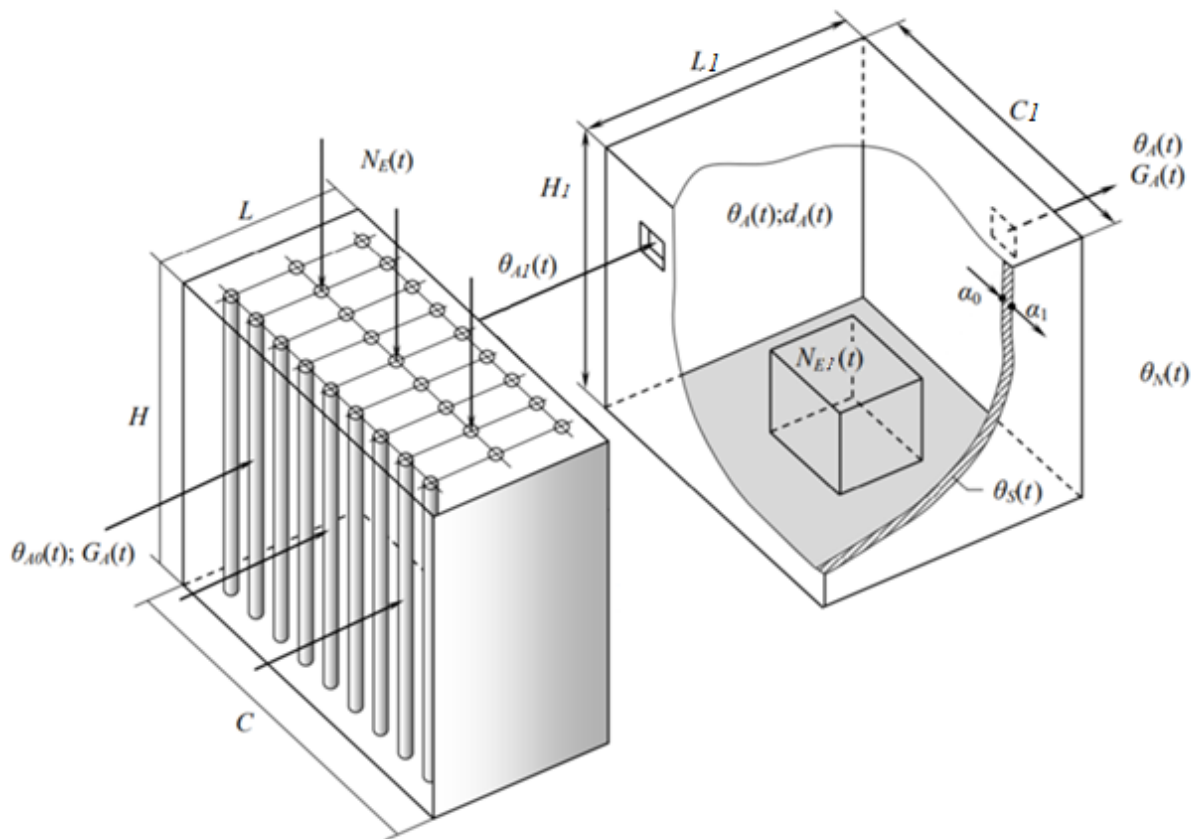


Рис. 2.4. Схема електрокалорифера та приміщення з вхідними і вихідними матеріальними потоками

Наведемо рівняння теплового балансу для кожного елементу електричного калорифера. Тепловий баланс ТЕН:

$$N_E - \alpha_e F_0 (\theta_E - \theta_{A1}) = M_E c_E \frac{d\theta_E}{dt}, \quad (2.2)$$

де  $c_E$  – теплоємність ТЕН (дана величина усереднена, бо ТЕН складається з різних матеріалів, теплоємність у яких різна),  $M_E$  – маса ТЕНів,  $\alpha_e$  – коефіцієнт тепловіддачі між повітря у середині калорифера і зовнішньою поверхнею ТЕНів,  $F_0$  – площа поверхні ТЕНів. Спростимо рівняння (2.2) та отримаємо:

$$T_E \frac{d\Delta\theta_E}{dt} + \Delta\theta_E = k_0 \Delta N_E + k_1 \Delta\theta_{A1}, \quad (2.3)$$

де  $K_E = \alpha_e F_0$ ,  $T_E = \frac{c_E M_E}{K_E}$ ,  $k_0 = \frac{1}{K_E}$ ,  $k_1 = 1$ .

Запишемо рівняння теплового балансу для повітря калорифера:

$$G_A c_A (\theta_{A0} - \theta_{A1}) + \alpha_e F_0 (\theta_E - \theta_{A1}) = M_A c_A \frac{d\theta_A}{dt}, \quad (2.4)$$

де  $c_A$  – теплоємність повітря,  $M_A$  – маса повітря в об'ємі калорифера. Спростимо рівняння (2.4) та отримаємо:

$$T_A \frac{d\Delta\theta_{A1}}{dt} + \Delta\theta_{A1} = k_2 \theta_E + k_3 \Delta\theta_{A0} + k_4 \Delta G_A, \quad (2.5)$$

де  $K_A = c_A G_A + \alpha_e F_0$ ,  $T_A = \frac{c_A M_A}{K_A}$ ,  $k_2 = \frac{\alpha_e F_0}{K_A}$ ,  $k_3 = 1 - k_2$ ,  $k_4 = \frac{c_A (\theta_{A0} - \theta_{A1})}{K_A}$ .

Запишемо рівняння транспортного запізнення, яке вносить повітропровід:

$$\theta_{A2}(t) = \theta_{A1}(t - \tau), \quad (2.6)$$

де  $\tau$  час запізнення, яке вносить повітропровід.

Запишемо рівняння теплового балансу для повітряного простору приміщення:

$$G_A c_A (\theta_{A2} - \theta_A) - \alpha_0 F_0 (\theta_A - \theta_S) + N_{E1} = c_A M_A \frac{d\theta_A}{dt}, \quad (2.7)$$

де  $c_A$  теплоємність повітря,  $\alpha_0$  коефіцієнт тепловіддачі в приміщенні ( між повітрям та стінами),  $M_A$  маса повітря в приміщенні об'ємом  $V_A$ .

Спростимо рівняння (2.7) та отримаємо:

$$T_{A1} \frac{d\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_5 \Delta\theta_{A2} + k_6 \Delta G_A + k_7 \Delta\theta_S + k_8 \Delta N_{E1}, \quad (2.8)$$

де  $K_{A1} = c_A G_A + \alpha_0 F_0$ ,  $T_{A1} = \frac{c_A M_A}{K_{A1}}$ ,  $k_5 = \frac{c_A G_A}{K_{A1}}$ ,  $k_6 = \frac{\theta_{A0} - \theta_A}{K_{A1}}$ ,  $k_7 = \frac{\alpha_0 F_0}{K_{A1}}$ ,  $k_8 = \frac{1}{K_{A1}}$ .

Запишемо рівняння теплового балансу для теплоізолюючої стінки приміщення:

$$\alpha_0 F_0 (\theta_A - \theta_S) - \alpha_1 F_1 (\theta_S - \theta_N) = c_S M_S \frac{d\theta_S}{dt}, \quad (2.9)$$

де  $c_S$  теплоємність стін,  $\alpha_1$  коефіцієнт тепловіддачі ззовні (між стінами та навколишнім повітрям),  $M_S$  маса матеріалу стін.

Спростимо рівняння (2.9) та отримаємо:

$$T_S \frac{d\theta_S}{dt} + \Delta\theta_S = k_9 \Delta\theta_A + k_{10} \Delta\theta_N, \quad (2.10)$$

де  $K_S = \alpha_0 F_0 + \alpha_1 F_1$ ,  $T_S = \frac{c_S M_S}{K_S}$ ,  $k_9 = \frac{\alpha_0 F_0}{K_S}$ ,  $k_{10} = 1 - k_9$ .

Отже, з рівнянь (2.3), (2.5), (2.6), (2.8) та (2.10) отримали систему рівнянь, яка утворює комплексну математичну модель електрокалорифера та приміщення:

$$\begin{cases} T_E \frac{d\Delta\theta_E}{dt} + \Delta\theta_E = k_0 \Delta N_E + k_1 \Delta\theta_{A1} \\ T_A \frac{d\Delta\theta_{A1}}{dt} + \Delta\theta_{A1} = k_2 \theta_E + k_3 \Delta\theta_{A0} + k_4 \Delta G_A \\ \theta_{A2}(t) = \theta_{A1}(t - \tau) \\ T_{A1} \frac{d\theta_A}{dt} + \Delta\theta_A = k_5 \Delta\theta_{A2} + k_6 \Delta G_A + k_7 \Delta\theta_S + k_8 \Delta N_{E1} \\ T_S \frac{d\theta_S}{dt} + \Delta\theta_S = k_9 \Delta\theta_A + k_{10} \Delta\theta_N \end{cases} \quad (2.11)$$

Для системи рівнянь (2.11) застосуємо перетворення Лапласа відносно змінної  $t$ .

$$\begin{cases} \Delta\theta_E (T_E p + 1) = k_0 \Delta N_E + k_1 \Delta\theta_{A1} \\ \Delta\theta_{A1} (T_A p + 1) = k_2 \theta_E + k_3 \Delta\theta_{A0} + k_4 \Delta G_A \\ \theta_{A2} = \theta_{A1}^{-p\tau} \\ \Delta\theta_A (T_{A1} p + 1) = k_5 \Delta\theta_{A2} + k_6 \Delta G_A + k_7 \Delta\theta_S + k_8 \Delta N_{E1} \\ \Delta\theta_S (T_S p + 1) = k_9 \Delta\theta_A + k_{10} \Delta\theta_N \end{cases} \quad (2.12)$$

Приведемо систему (2.12) до зручної форми для моделювання у Simulink:

$$\begin{cases} \Delta\theta_E = \frac{k_0}{T_{Ep+1}} \Delta N_E + \frac{k_1}{T_{Ep+1}} \Delta\theta_{A1} \\ \Delta\theta_{A1} = \frac{k_2}{T_{Ap+1}} \theta_E + \frac{k_3}{T_{Ap+1}} \Delta\theta_{A0} + \frac{k_4}{T_{Ap+1}} \Delta G_A \\ \theta_{A2} = \theta_{A1}^{-p\tau} \\ \Delta\theta_A = \frac{k_5}{T_{A1p+1}} \Delta\theta_{A1} + \frac{k_6}{T_{A1p+1}} \Delta G_A + \frac{k_7}{T_{A1p+1}} \Delta\theta_S + \frac{k_8}{T_{A1p+1}} \Delta N_{E1} \\ \Delta\theta_S = \frac{k_9}{T_{Sp+1}} \Delta\theta_A + \frac{k_{10}}{T_{Sp+1}} \Delta\theta_N \end{cases} \quad (2.13)$$

Система рівнянь (2.13) описує кожний елемент динамічної моделі у просторі Лапласа, тобто за допомогою даних рівнянь можна отримати передаточну функцію кожного елемента. Також за допомогою даної системи рівнянь можна змодельовати у середовищі Simulink динамічну модель послідовно з'єднавши кожен елемент моделі та отримати перехідний процес зміни температури у приміщення.

### **2.3. Моделювання перехідних характеристик динамічної моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні**

Змодельуємо перехідні характеристики динамічної моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні. Для моделювання необхідні параметри електрокалорифера та параметри приміщення, а також розрахувати коефіцієнти системи рівнянь (2.13).

Параметри електрокалорифера для розрахунку динамічної моделі виробничого приміщення наведені у таблиці 2.1. Параметри приміщення для розрахунку динамічної моделі виробничого приміщення наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.1. Параметри електрокалорифера НК 400x200-4,5-3

| Назва параметру                                  | Позначення          | Числове значення | Розмірність            |
|--------------------------------------------------|---------------------|------------------|------------------------|
| Габарити калорифера                              | $H \cdot L \cdot C$ | 0,2 · 0,4 · 0,2  | м                      |
| Електрична потужність                            | $N_E$               | 4500             | Вт                     |
| Загальна маса ТЕНів                              | $M_E$               | 4,5              | кг                     |
| Теплоємність ТЕНа                                | $c_E$               | 430              | Дж/(кг°С)              |
| Коефіцієнт тепловіддачі для внутрішньої поверхні | $\alpha_0$          | 1500             | Вт/(м <sup>2</sup> °С) |
| Площа теплообміну                                | $F_0$               | 0,35             | м <sup>2</sup>         |
| Теплоємність повітря                             | $c_A$               | 1010             | Дж/(кг°С)              |
| Маса повітря в калорифері                        | $M_A$               | 0,019            | кг                     |
| Витрата повітря                                  | $G_A$               | 0.19             | кг/с                   |
| Вхідна температура повітря                       | $\theta_{A0}$       | 20               | °С                     |
| Вихідна температура повітря                      | $\theta_A$          | 22               | °С                     |

Таблиця 2.2. Параметри приміщення

| Назва параметру                                    | Позначення          | Числове значення      | Розмірність            |
|----------------------------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Габарити приміщення                                | $H \cdot L \cdot C$ | $3 \cdot 10 \cdot 10$ | м                      |
| Густина повітря                                    | $\rho_A$            | 1,2                   | кг/м <sup>3</sup>      |
| Об'єм повітря                                      | $V_A$               | 300                   | м <sup>3</sup>         |
| Витрата повітря                                    | $G_A$               | 0,19                  | кг/с                   |
| Теплоємність повітря                               | $c_A$               | 1010                  | Дж/(кг°С)              |
| Маса повітря                                       | $M_A$               | 360                   | кг                     |
| Площа теплообміну в середині приміщення            | $F_0$               | 120                   | м <sup>2</sup>         |
| Коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні стіни | $\alpha_0$          | 8,7                   | Вт/(м <sup>2</sup> °С) |
| Густина стіни                                      | $\rho_S$            | 1750                  | кг/м <sup>3</sup>      |
| Теплоємність стіни                                 | $c_S$               | 920                   | Дж/(кг°С)              |

Для розрахунку коефіцієнтів динамічної моделі використовувався Matlab. Код m файлу:

```

% параметри
Nek=4500;
Mek=4.5;
sek=430;
alpha0k=1500;
F0k=0.35;
cak=1010;
Mak=0.019;
Ga=0.19;
ta0k=20;
tak=22;
pap=1.2;
Var=300;
cap=1010;
Map=360;
F0p=120;
alpha0p=8.7;
psp=1750;
csp=920;
Msp=87000;
F1p=130;

```

```

alpha1p=23;
ta0p=22;
tap=22.2;
da0p=9.2;
dap=9;
% рівняння
Ke=alpha0k*F0k;
T_E=(cek*Mek)/(Ke);
Ka1=cap*Ga+alpha0p*F0p;
Ks=alpha0p*F0p+alpha1p*F1p;
T_A1=(cap*Map)/(Ka1);
T_S=(csp*Msp)/(Ks);
Ka=cak*Ga+alpha0k*F0k;
T_A=(cak*Mak)/(Ka);
k_0=1/Ke;
k_1=1;
k_2=(alpha0k*F0k)/(Ka);
k_3=1-k_2;
k_4=(cak*(ta0k-tak))/(Ka);
k_5=(cap*Ga)/(Ka1);
k_6=(ta0p-tap)/(Ka1);
k_7=(alpha0p*F0p)/(Ka1);
k_8=1/Ka1;
k_9=(alpha0p*F0p)/(Ks);
k_10=1-k_9;

```

Для отримання перехідних характеристик змодельємо динамічну модель підтримання температурного режиму у складському приміщенні за допомогою Simulink на основі структурної схеми з рисунку 2.3. Модель підтримання температурного режиму у складському приміщенні у Simulink наведена на рисунку 2.5. Зображена структурна схема для моделювання відповідає системі рівнянь (2.13).

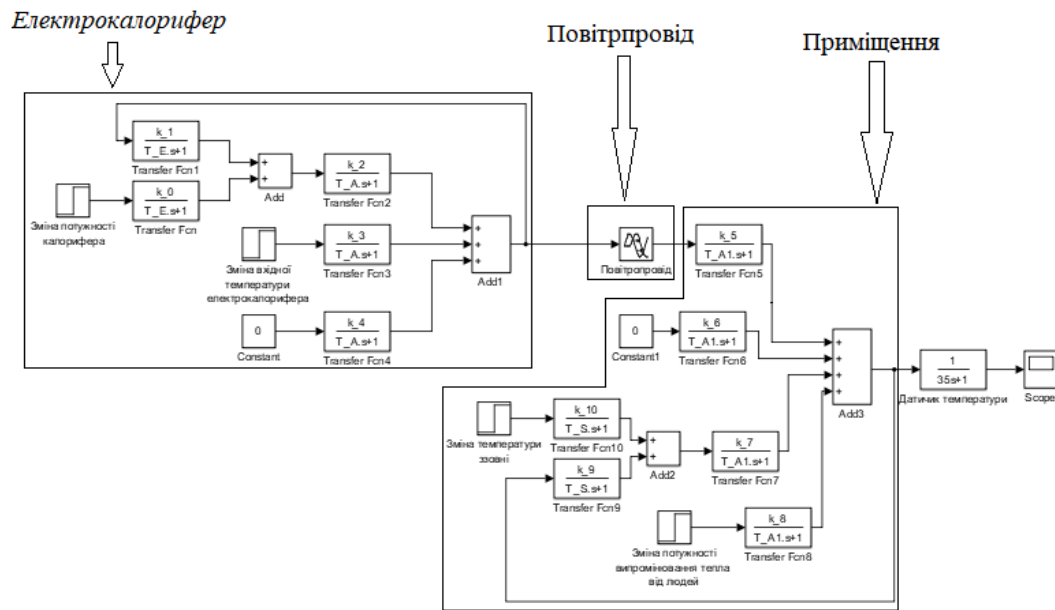


Рис. 2.5. Модель підтримання температурного режиму у складському приміщенні у Simulink

Побудуємо графік перехідної характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні потужності електрокалорифера на 1000 Вт рис. 2.6, тобто за каналом регулювання.

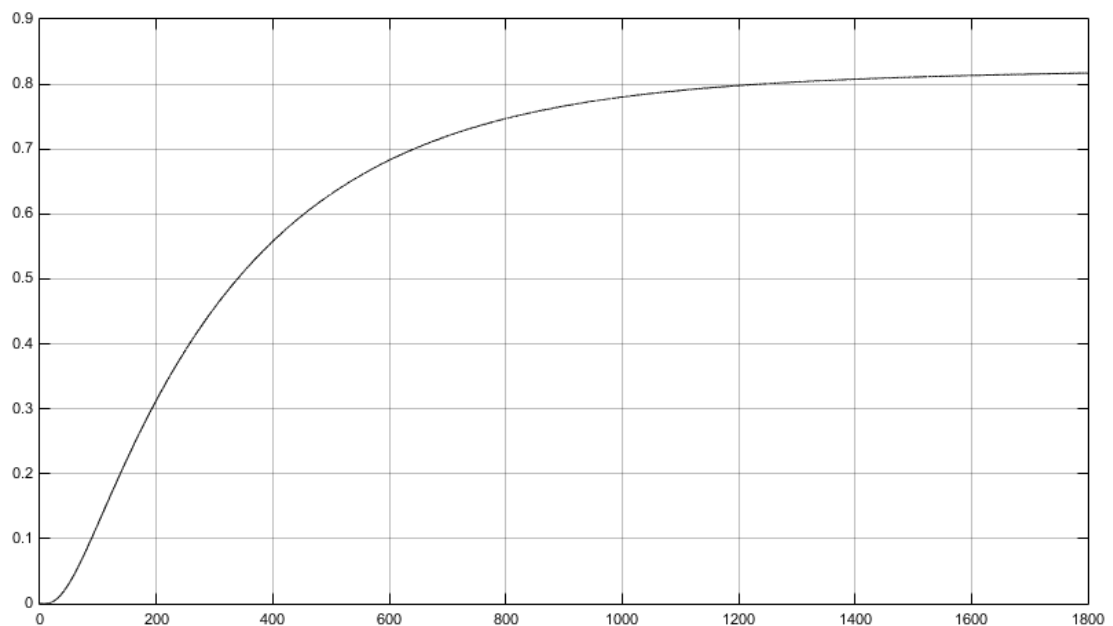


Рис. 2.6. Графік перехідної характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні потужності електрокалорифера на 1000 Вт

Побудуємо графік перехідної характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні температури на вході електрокалорифера на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  рис. 2.7, тобто за каналом збурення.

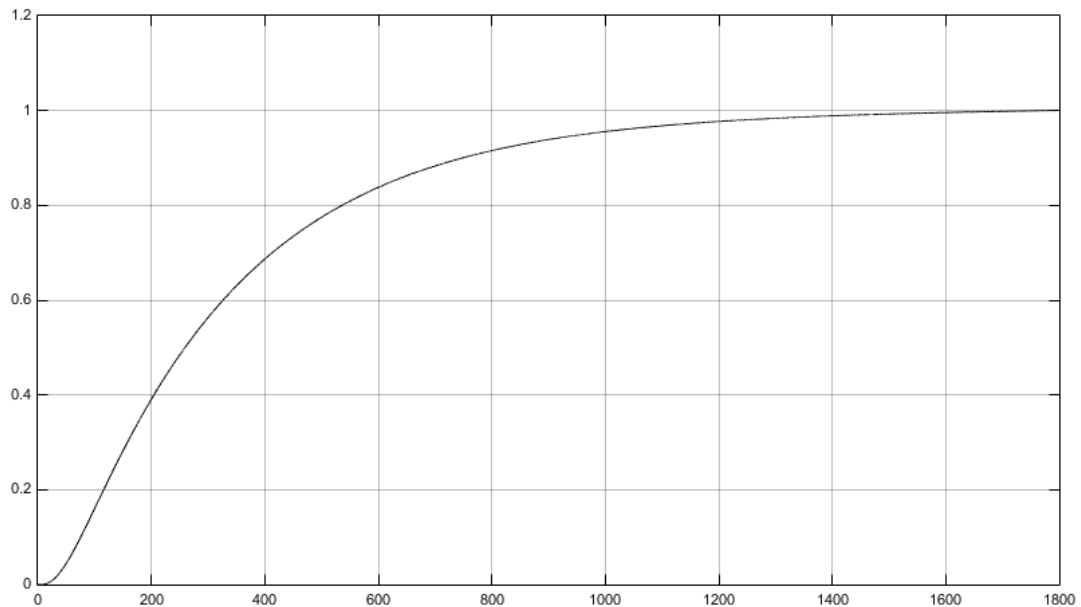


Рис. 2.7. Графік перехідної характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні температури на вході електрокалорифера на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Побудуємо графік перехідної характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні температури ззовні приміщення на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  рис. 2.8, тобто за каналом збурення.

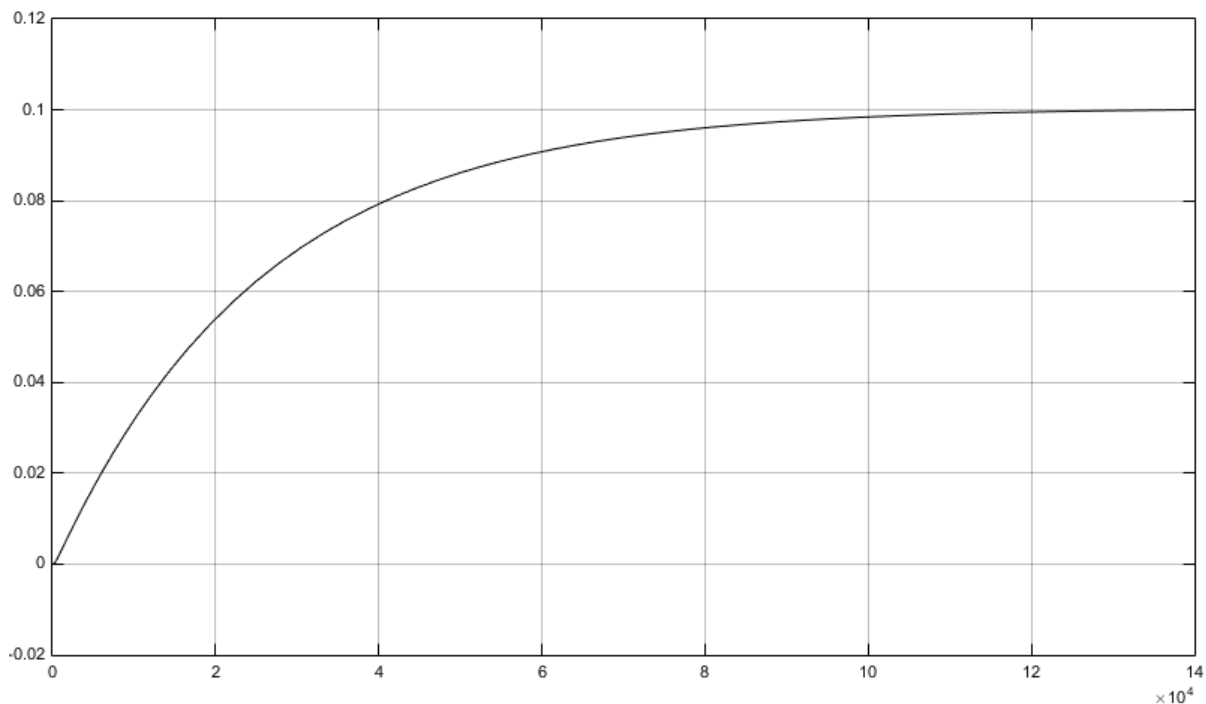


Рис. 2.8. Графік перехідної характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні температури ззовні приміщення на 1 °C

Побудуємо графік перехідної характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні потужності випромінювання тепла від людей у приміщення на 100 Вт рис. 2.9, тобто за каналом збурення.

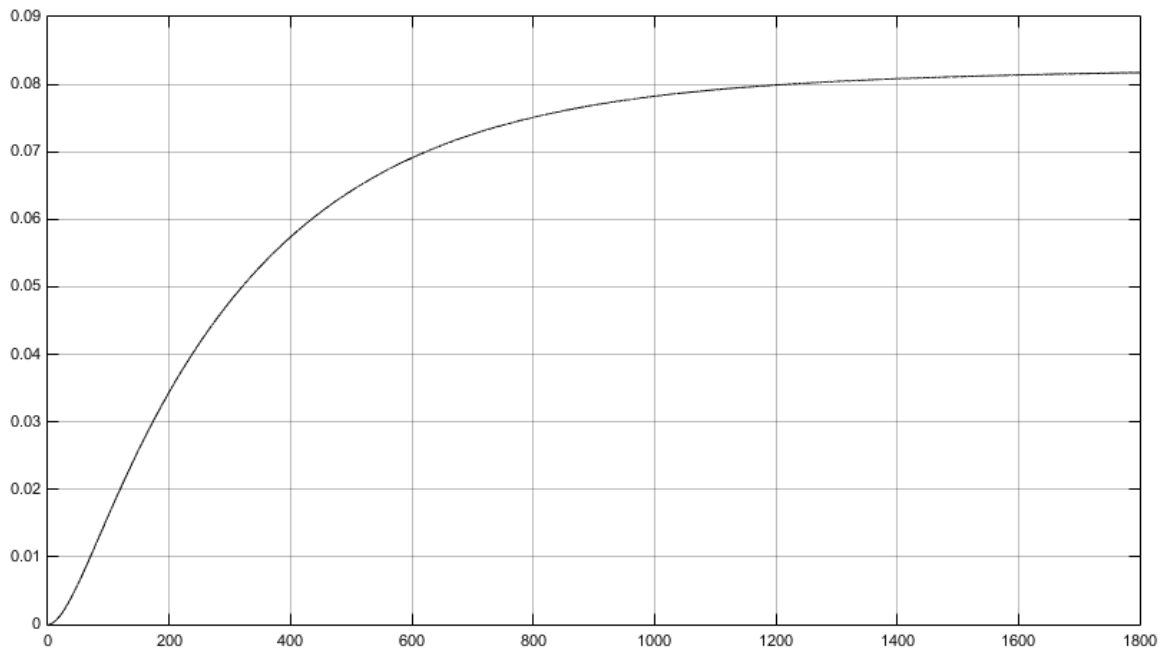


Рис. 2.9. Графік перехідної характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні потужності випромінювання тепла від людей у приміщення на 100 Вт

#### 2.4. Апроксимація перехідних характеристик динамічної моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні

Апроксимуємо перехідну характеристику характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні потужності електрокалорифера на 1000 Вт за допомогою методу логарифмування. Значення коефіцієнта передачі:  $K = 0,8171$ . Значення постійної часу:  $T = 1,25(t_B - t_A) = 1,25((0,7)\varphi_\infty - (0,33)\varphi_\infty) = 1,25(417 - 174) = 304$ . Значення транспортного запізнення:  $\tau = 52$ . Отже передаточна функція за каналом регулювання, зміна потужності електрокалорифера на 1000 Вт, має вигляд:

$$W_p = \frac{0,8171}{304p+1} e^{-52p} \quad (2.14)$$

Порівняємо апроксимований і неапроксимований перехідний процес рис. 2.10.

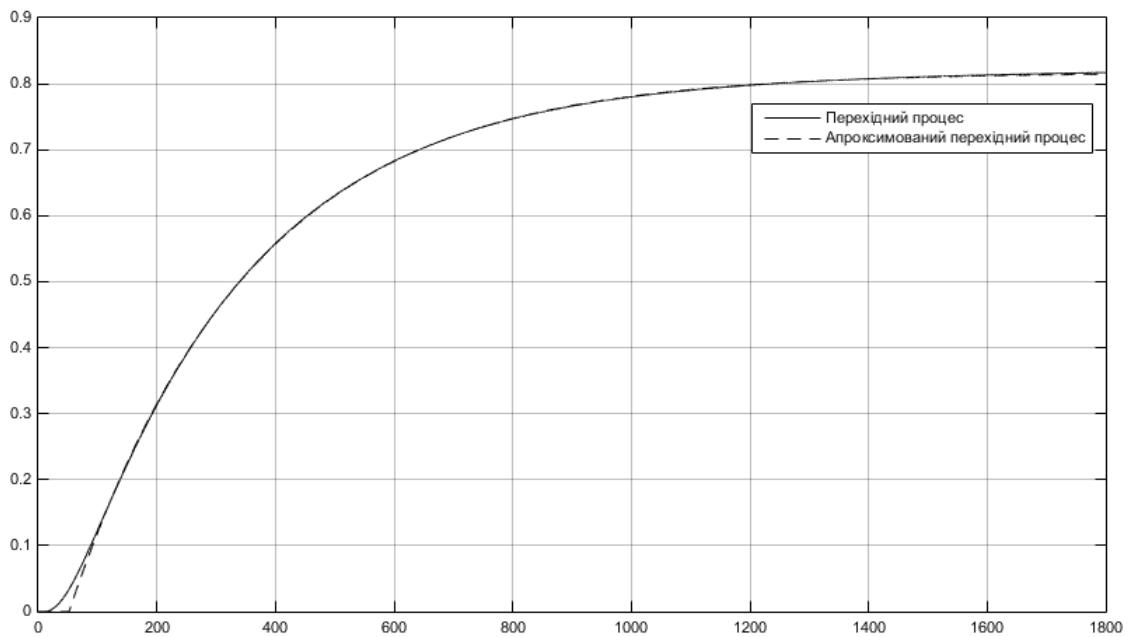


Рис. 2.10. Порівняння апроксимованого і неапроксимованого перехідного процесу моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні потужності електрокалорифера на 1000 Вт

Апроксимуємо перехідну характеристику характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні температури на вході електрокалорифера на 1 °С. Значення коефіцієнта передачі:  $K = 1$ . Значення постійної часу:  $T = 1,25(408 - 169) = 299$ . Значення транспортного запізнення:  $\tau = 52$ . Отже передаточна функція за каналом збурення, зміна температури на вході електрокалорифера на 1 °С, має вигляд:

$$W_{зб.вх} = \frac{1}{354p+1} e^{-52p} \quad (2.15)$$

Порівняємо апроксимований і неапроксимований перехідний процес рис. 2.11.

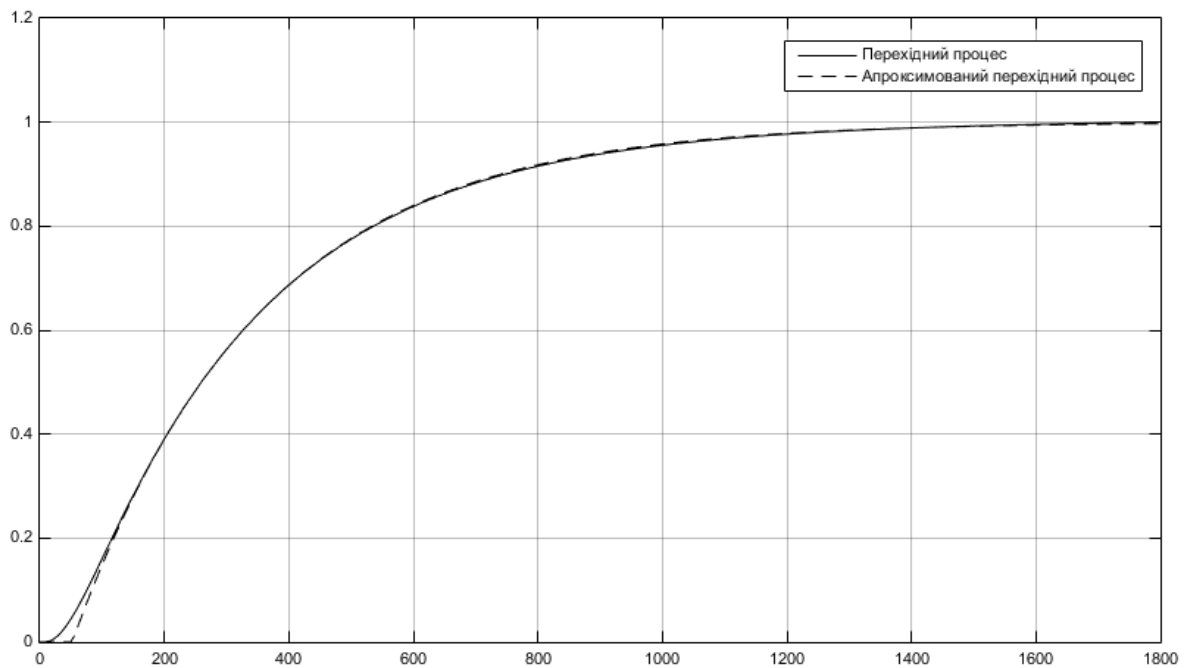


Рис. 2.11. Порівняння апроксимованого і неапроксимованого перехідного процесу моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні температури на вході електрокалорифера на 1 °С

Апроксимуємо перехідну характеристику характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні температури зовні приміщення на 1 °С. Значення коефіцієнта передачі:  $K = 0,1$ . Значення постійної часу:  $T = 1,25(30320 - 10160) = 25200$ . Значення транспортного запізнення:  $\tau = 300$ . Отже передаточна функція за каналом збурення, зміна температури зовні приміщення на 1 °С, має вигляд:

$$W_{зб.з} = \frac{0,1}{25200p+1} e^{-300p} \quad (2.16)$$

Порівняємо апроксимований і неапроксимований перехідний процес рис. 2.12.

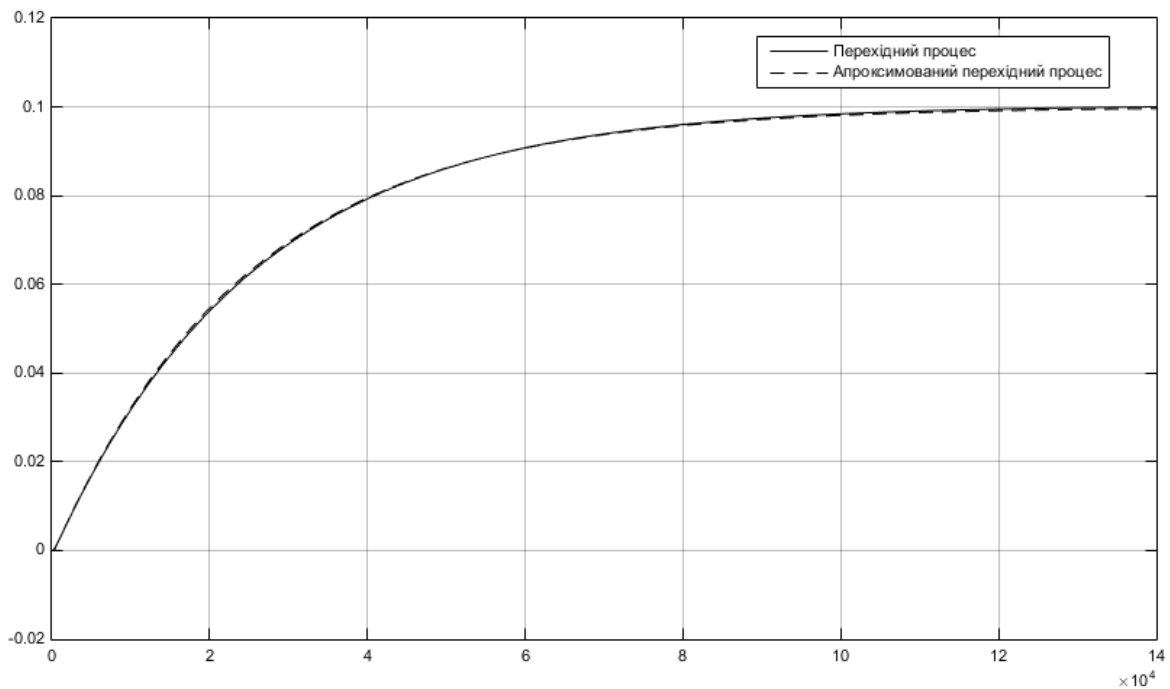


Рис. 2.12. Порівняння апроксимованого і неапроксимованого перехідного процесу моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні температури ззовні приміщення на 1 °С

Апроксимуємо перехідну характеристику характеристики моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні потужності випромінювання тепла від людей у приміщення на 100 Вт. Значення коефіцієнта передачі:  $K = 0.08174$ . Значення постійної часу:  $T = 1,25(395 - 155) = 300$ . Значення транспортного запізнення:  $\tau = 35$ . Отже передаточна функція за каналом збурення, зміна потужності випромінювання тепла від людей у приміщення на 100 Вт, має вигляд:

$$W_{зб.вн} = \frac{0.08174}{300p+1} e^{-35p} \quad (2.17)$$

Порівняємо апроксимований і неапроксимований перехідний процес рис. 2.13.

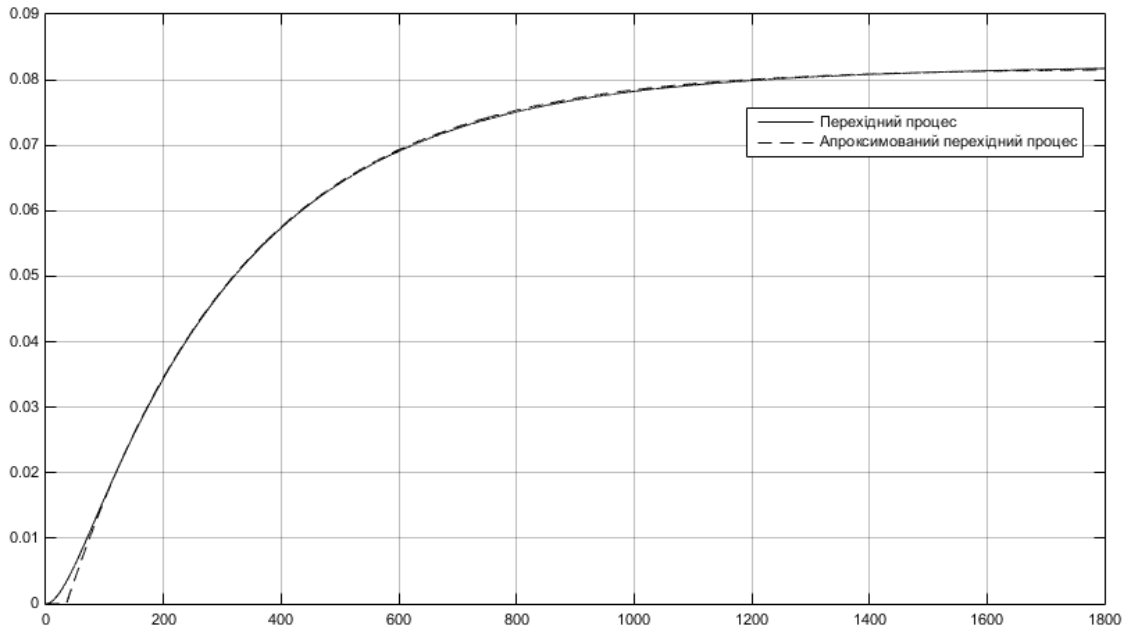


Рис. 2.13. Порівняння апроксимованого і неапроксимованого перехідного процесу моделі підтримання температурного режиму у складському приміщенні при зміні потужності випромінювання тепла від людей у приміщення на 100 Вт

### 3. РОЗРАХУНОК ПРЕЦИЗІЙНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПІДТРИМАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ БАГАТОЦІЛЬОВОГО СКЛАДУ

#### 3.1. Структурна схема регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу

Найбільш суттєве збурення – це збурення від зміни вхідної температури електрокалорифера, передаточна функція (2.15), це впливає з спрощеної структурної схеми рис. 2.3 та передаточних функцій отриманих у пункті 2.4. На основі цих даних побудовано схему прецизійного регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу рис. 3.1.

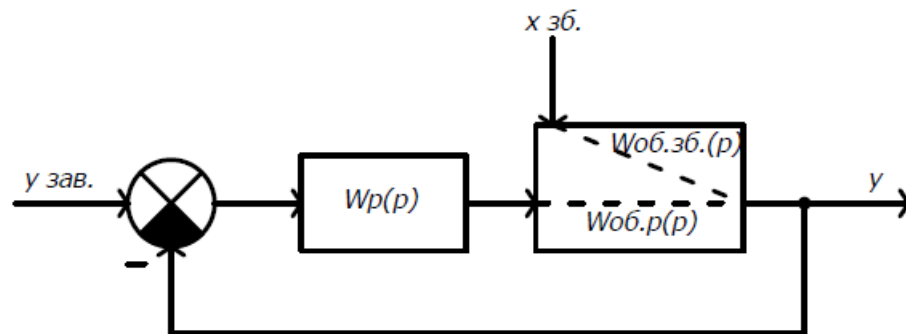


Рис. 3.1. Структурна схема прецизійного регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу

Прецизійне регулювання температурного режиму багатоцільового складу передбачає зміну заданої температури залежно від зберігаємої продукції. Це означає, що задане значення буде змінюватися, тобто система прецизійного регулювання повинна реагувати на зміну завдання.

Отже, для нашого випадку передаточна функцію замкнутої системи регулювання на основі передаточних функцій (2.15), (2.14) та спрощеної структурна схема підтримання температурного режиму у складському приміщенні:

$$W_{зс.}(p) = \frac{W_{об.р.}(p) \cdot W_p(p)}{1 + W_{об.р.}(p) \cdot W_p(p)} \quad (3.1)$$

### 3.2. Розрахунок періоду дискретизації системи регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу

Для розрахунку дискретної системи регулювання необхідно, щоб час дискретизації регулятора був більший за мінімально допустимий час дискретизації при якому система вважається аналоговою.

Для розрахунку мінімально допустимого часу дискретизації при якому система вважається аналоговою використовувалась теорема Котельникова-Шеннона. Теорема Котельникова-Шеннона говорить, що частота дискретизації повинна бути не менше, ніж дві частоти зрізу.

Для визначення частоти зрізу використовувалося середовище Matlab. Для побудови АЧХ рис. 3.2 використовувалась передаточна функція (2.15) збурення від теплового випромінювання людей у середині складського приміщення. Код m файлу:

```
figure %АЧХ
w = 0:0.00001:0.08;
W = ((0.8171) ./ (304.*1i*w+1)) .* exp(-52.*1i*w);
A = ((real(W)).^2 + (imag(W)).^2).^(1/2);
plot(w,A,'k','linewidth',2);
grid on;
title('\bf\fontsize{12} АЧХ ');
xlabel('\bf\fontsize{12} w');
ylabel('\bf\fontsize{12} A(w)');
```

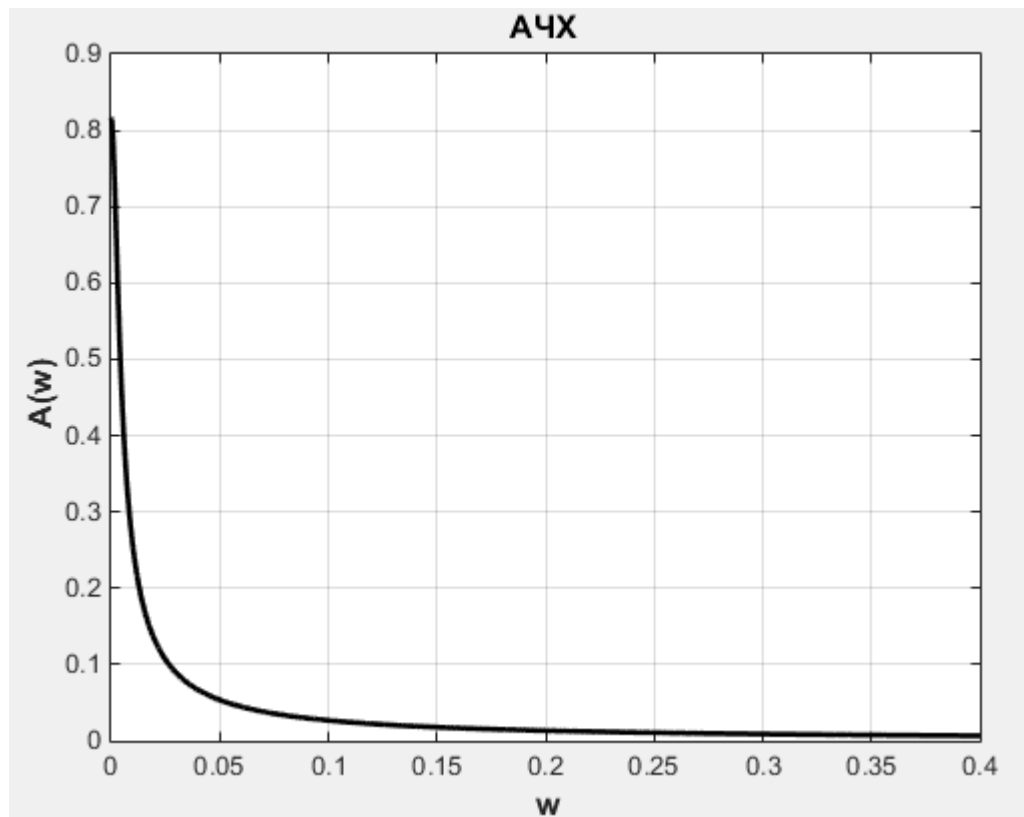


Рис. 3.2. АЧХ передаточної функції збурення від теплового випромінювання людей у середині складського приміщення

Згідно з АЧХ рис. 3.2 частота зрізу дорівнює  $\omega_3 = 0,25$ . Для розрахунку періоду дискретизації використовується наступна формула:

$$T = \frac{\pi}{2\omega_3} \quad (3.2)$$

За допомогою формули (3.2) розрахуємо період мінімально допустимого часу дискретизації при якому система вважається аналоговою:

$$T = \frac{\pi}{2 \cdot 0,25} = 6,28 \text{ с.} \quad (3.3)$$

Отже, з рівняння (3.3) видно, що для того щоб система керування регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу була дискретною необхідно, щоб період дискретизації був більше, ніж 6,28 секунди.

### 3.3. Розрахунок прецизійної системи регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу

У пункті 3.1 зазначалося, що система регулювання націлена на зміну завдань. Метод розрахунку системи повинен бути націлений на мінімальний інтегральний квадратичний показник якості за технологічними умовами роботи системи керування:  $I_{\text{кв}} = \int_0^{\infty} e_n^2(t) dt$ , де  $e_n$  помилка регулювання.

Методи розрахунку, які націлені на мінімальний інтегральний квадратичний показник якості призначені на швидке усування великих за значенням помилок регулювання, але невеликі за значенням помилки регулювання можуть зберігатися протягом тривалого часу. Для прецизійної системи регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу невеликі за значенням помилки регулювання є допустимі, а великі за значенням є недопустимі. При розрахунку системи регулювання методом націленим на мінімальний інтегральний квадратичний показник якості система буде ефективно змінювати завдання та гасити збурення.

#### 3.3.1. Розрахунок цифрової системи регулювання з ШІМ модуляцією

Для розрахунку цифрової системи регулювання необхідно задати час дискретизації системи, який більше за мінімально допустимий час дискретизації при якому система вважається аналоговою. Для дискретної системи регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу задаємо час дискретизації 10 секунд.

Для регулювання використовується дискретний ПІ регулятор, даний регулятор забезпечує регулювання без статичної похибки та з необхідним періодом дискретизації. Для розрахунку параметрів ПІ регулятора використовувались формули з [7], які націлені на мінімальний інтегральний квадратичний показник якості:

$$K = \frac{1}{K_{об.}} (0,329 + 0,751 \left(\frac{T_{об.}}{\tau}\right)^{0,783} - 0,257 \frac{T}{T_{об.}}) \quad (3.4)$$

$$T_i = 1,186T_{об.} + 0,652\tau - 0,587T \quad (3.5)$$

З формули (3.4) та (3.5) були отримані такі параметри налаштування регулятора:  $K = 4$ ,  $T_i = 388$ . Дискретний ПІ регулятор буде керувати об'єктом управління за допомогою ШІМ модуляції з змінним періодом імпульсу. Графік перехідного процесу цифрової системи регулювання за каналом регулювання зміна потужності електрокалорифера – вихід наведений на рис. 3.3. Інтегральні показники якості для цифрової системи наведені у таблиці 3.1. Схема моделювання перехідного процесу у Simulink наведена на рис. 3.4.

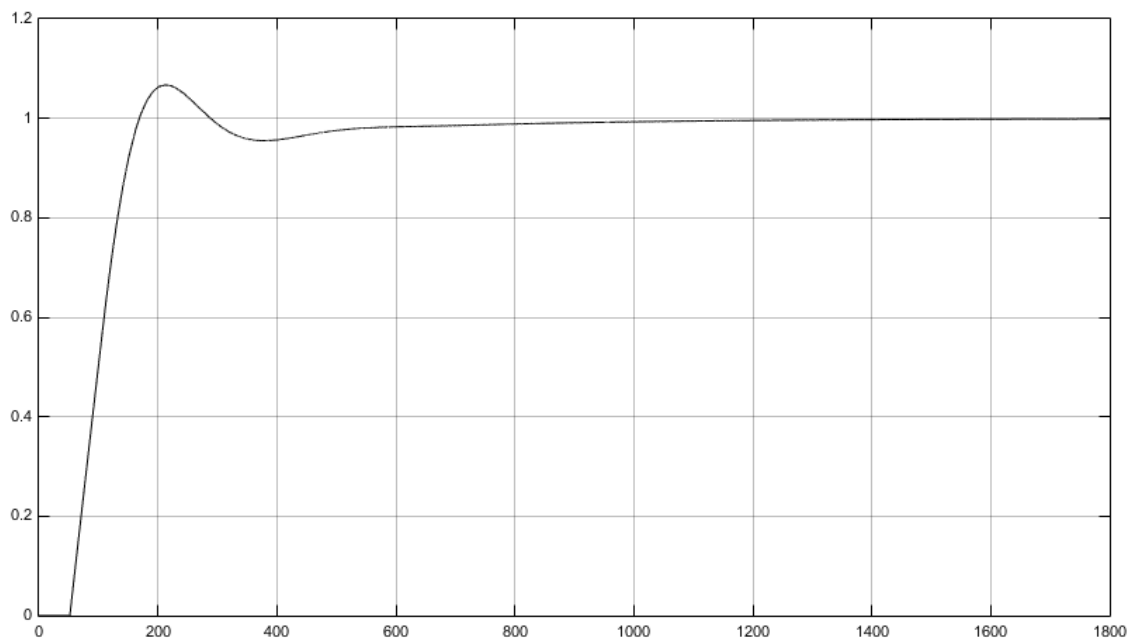


Рис. 3.3. Графік перехідного процесу цифрової системи регулювання з ШІМ модуляцією

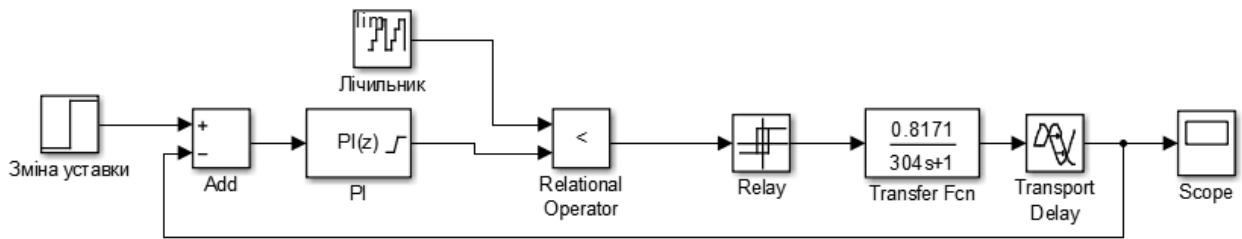


Рис. 3.4. Схема моделювання перехідного процесу цифрової системи регулювання з ШІМ модуляцією у Simulink

Таблиця 3.1. Інтегральні показники якості цифрової системи регулювання з ШІМ модуляцією

| $I_{\text{лін}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{абс}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{КВ}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{ШВД}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{час}}$ |
|------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1686             | 1686                          | 1658                         | 1593611                       | 1659                          |

### 3.3.2. Розрахунок аналогової системи регулювання

Розрахуємо аналогову систему регулювання за допомогою інженерного методу Smith (2002) [8]. Даний інженерний метод націлений на мінімальний інтегральний квадратичний показник якості, тобто зміна уставки. Розрахунок налаштування ПІ регулятора проводився за такими формулами:

$$K = \frac{0,586T_{\text{об.}}}{K_{\text{об.}} \cdot \tau} \quad (3.6)$$

$$T_i = T_{\text{об.}} \quad (3.7)$$

З формули (3.6) та (3.7) були отримані такі параметри налаштування регулятора:  $K = 4.2$ ,  $T_i = 304$ . Графік перехідного процесу аналогової системи регулювання за каналом регулювання зміна потужності електрокалорифера – вихід наведений на рис. 3.5. Інтегральні показники якості для аналогової системи наведені у таблиці 3.2.

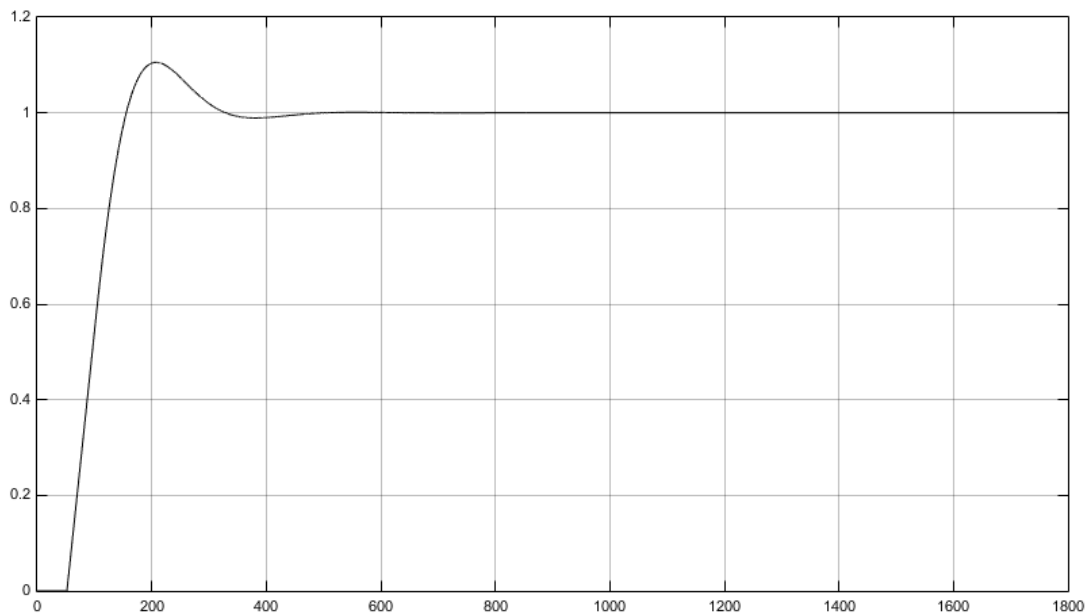


Рис. 3.5. Графік перехідного процесу аналогової системи регулювання

Таблиця 3.2. Інтегральні показники якості аналогової системи регулювання

| $I_{\text{лін}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{абс}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{кв}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{швд}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{час}}$ |
|------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1711             | 1711                          | 1705                         | 1617282                       | 1706                          |

### 3.3.3. Порівняння цифрової системи з ШІМ модуляцією і аналогової системи регулювання

Порівняємо цифрову систему з ШІМ модуляцією і аналогову систему регулювання за каналом регулювання зміна потужності електрокалорифера – вихід. Порівняння перехідних характеристик цифрової системи з ШІМ модуляцією і аналогової системи регулювання за каналом регулювання зміна потужності електрокалорифера – вихід наведено на рис. 3.6. Інтегральні показники якості цифрової і аналогової системи за каналом регулювання зміна потужності електрокалорифера – вихід наведено в таблиці 3.3.

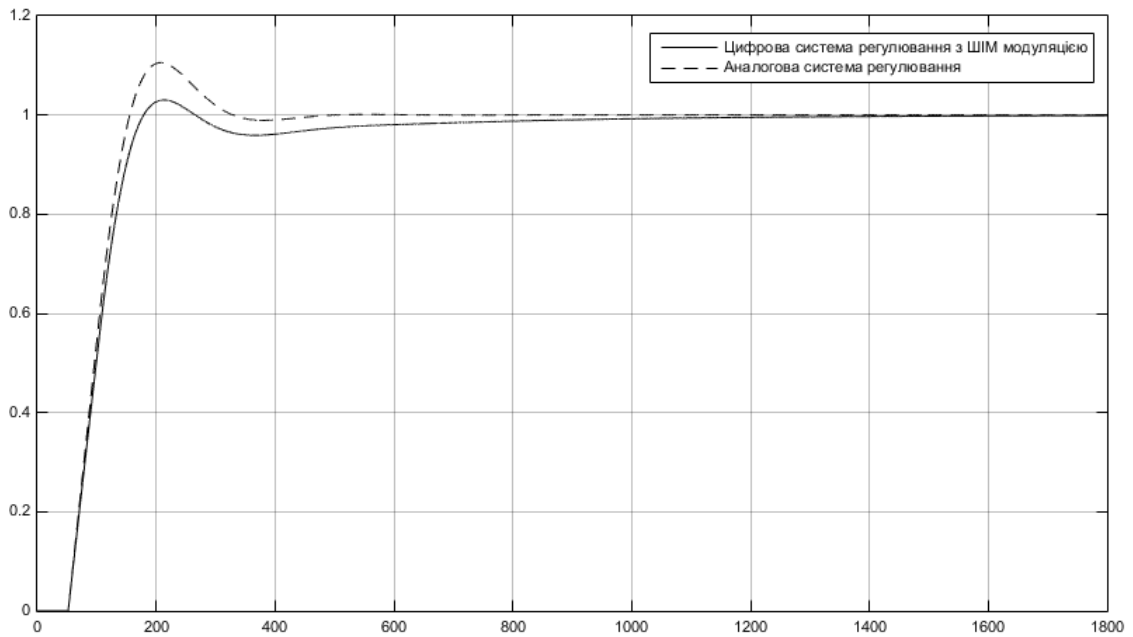


Рис. 3.6. Порівняння перехідних характеристик цифрової системи з ШІМ модуляцією і аналогової системи регулювання за каналом завдання – вихід

Таблиця 3.3. Порівняння інтегральних показників якості цифрової системи з ШІМ модуляцією і аналогової системи регулювання за каналом завдання – вихід

| Система           | $I_{\text{лін}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{абс}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{кв}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{ШВД}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{час}}$ |
|-------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Цифрова система   | 1686             | 1686                          | 1658                         | 1593611                       | 1659                          |
| Аналогова система | 1711             | 1711                          | 1705                         | 1617282                       | 1706                          |

Так як у системі наявні збурення порівнюємо цифрову системи з ШІМ модуляцією і аналогову системи регулювання за каналом збурення від зміни температури на вході в електрокалорифер – вихід. Порівняння перехідних характеристик цифрової системи з ШІМ модуляцією і аналогової системи регулювання за каналом збурення від зміни температури на вході в електрокалорифер – вихід наведено на рис. 3.7. Інтегральні показники якості

цифрової і аналогової системи за каналом збурення від зміни температури на вході в електрокалорифер – вихід наведено в таблиці 3.8.

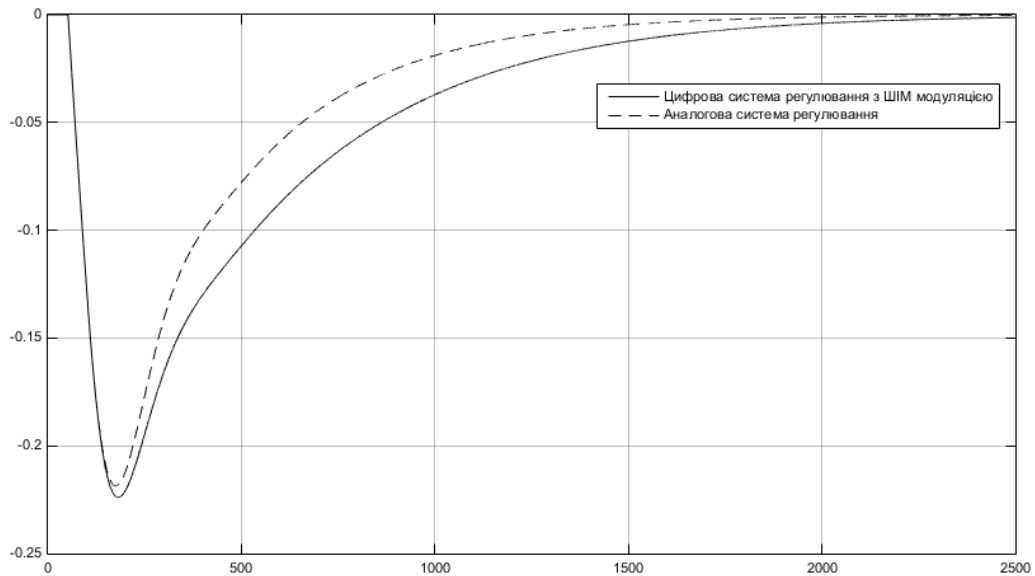


Рис. 3.7. Порівняння перехідних характеристик цифрової системи з ШІМ модуляцією і аналогової системи регулювання за каналом збурення – вихід

Таблиця 3.4. Порівняння інтегральних показників якості цифрової системи з ШІМ модуляцією і аналогової системи регулювання за каналом збурення – вихід

| Система           | $I_{\text{лін}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{абс}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{кв}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{швд}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{час}}$ |
|-------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Цифрова система   | -118             | 118                           | 14                           | 4942                          | 14                            |
| Аналогова система | -88              | 88                            | 10                           | 2967                          | 10                            |

З рисунків 3.6 і 3.7 та таблиць 3.3 і 3.4 видно, що аналогова система має кращий перехідні процеси та показники якості. Також обидві системи можуть компенсувати збурення. Графіки перехідних процесів аналогової і цифрової системи схожі та показники якості теж дуже близькі. Використання цифрової системи з ШІМ модуляцією більш доцільно, бо незважаючи на гірші показники якості та гірший перехідний процес, цифрова система задовольняє вимогами представленим до прецизійної системи регулювання підтримання

температурного режиму багатоцільового складу. Також цифрова система менше навантажує контролер, бо програмний код ПІ регулятора виконується не в кожному скані контролера.

### 3.3.4. Порівняння перехідних процесів розширеної та апроксимованої моделі

Порівняємо перехідні процеси розширеної та апроксимованої моделі при регулюванні за допомогою цифрового регулятора з ШІМ модуляцією зі змінним періодом імпульсів по каналу завдання – вихід рис. 3.8. Інтегральні показники якості порівняння перехідних процесів наведено у таблиці 3.5.

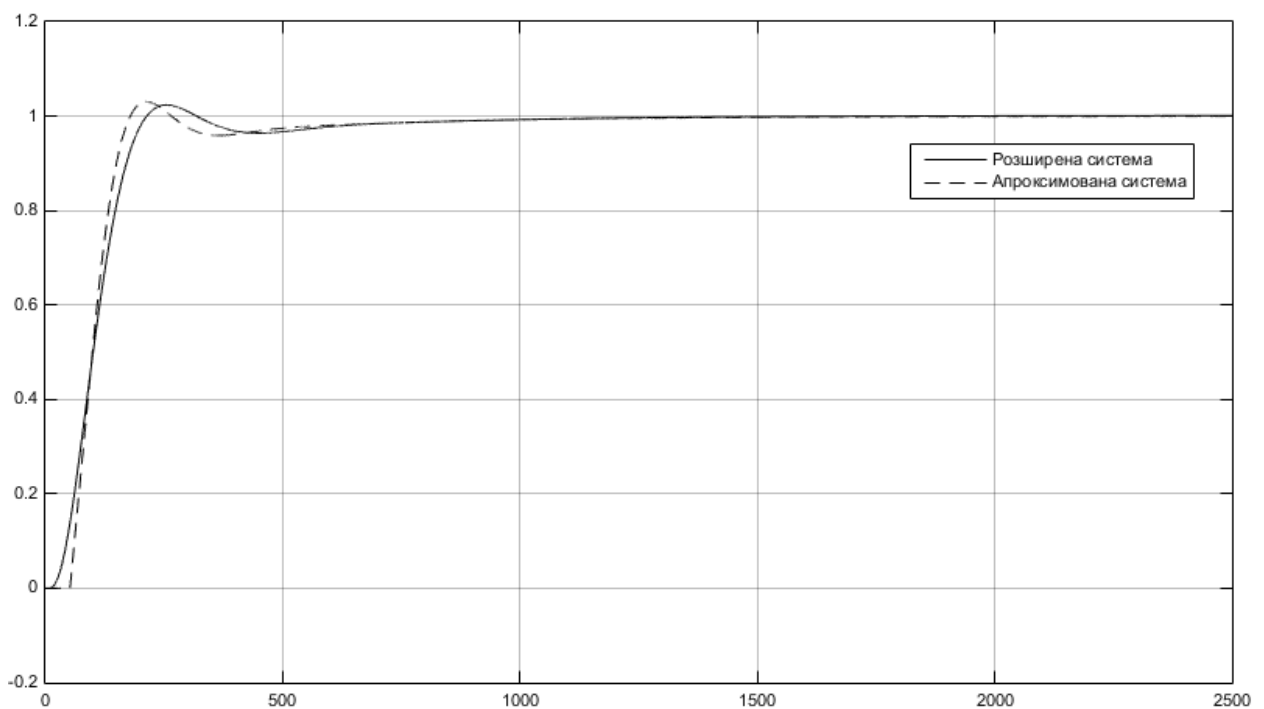


Рис. 3.8. Порівняння перехідних процесів розширеної та апроксимованої моделі при регулюванні за допомогою цифрового регулятора з ШІМ модуляцією зі змінним періодом імпульсів по каналу завдання – вихід

Таблиця 3.5. Порівняння інтегральних показників якості розширеної та апроксимованої моделі при регулюванні за допомогою цифрового регулятора з ШІМ модуляцією зі змінним періодом імпульсів по каналу завдання – вихід

| Система               | $I_{\text{лін}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{абс}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{кв}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{швд}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{час}}$ |
|-----------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Розширена система     | 2382             | 2382                          | 2343                         | 3098139                       | 2344                          |
| Апроксимована система | 2381             | 2381                          | 2347                         | 3093770                       | 2348                          |

З рисунку 3.8 та таблиці 3.5 видно, що перехідні процеси розширеної системи і апроксимованої дуже схожі. Це значить, що розрахунки налаштувань регулятора є коректними для реальної системи та забезпечать необхідну якість регулювання по каналу завдання – вихід.

Порівняємо перехідні процеси розширеної та апроксимованої моделі при регулюванні за допомогою цифрового регулятора з ШІМ модуляцією зі змінним періодом імпульсів по каналу збурення – вихід рис. 3.9. Інтегральні показники якості порівняння перехідних процесів наведено у таблиці 3.6.

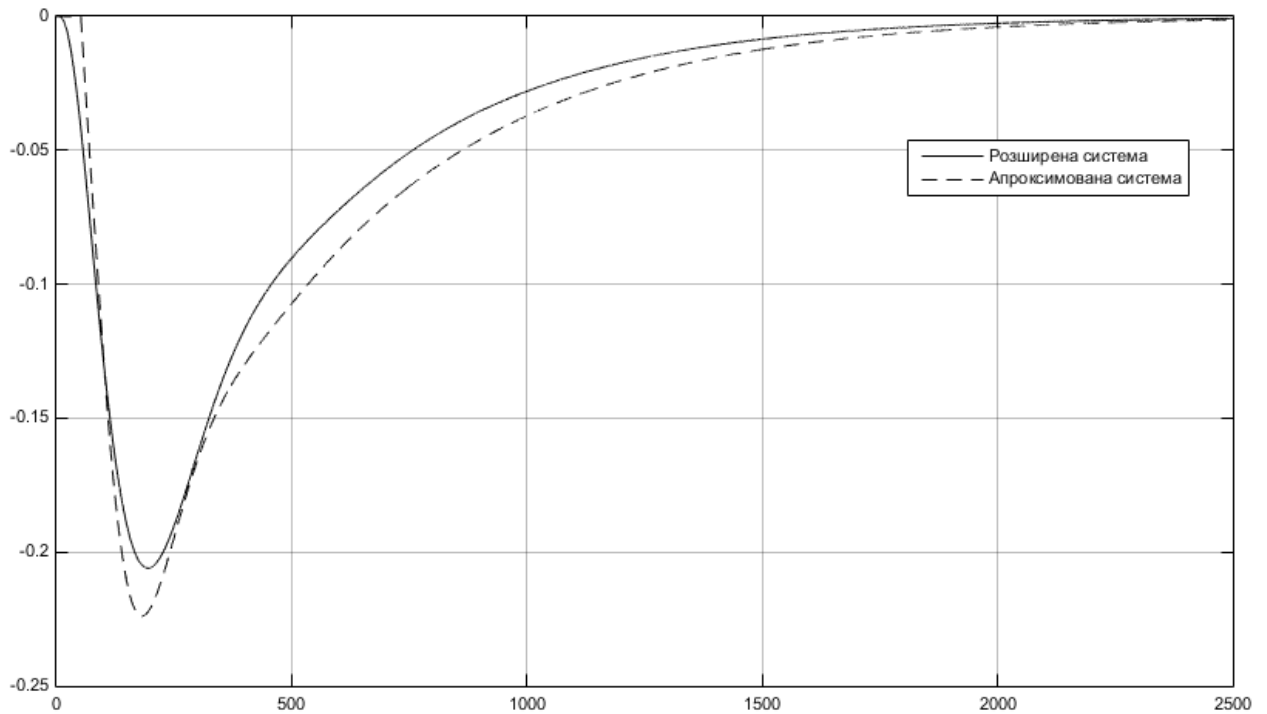


Рис. 3.9. Порівняння перехідних процесів розширеної та апроксимованої моделі при регулюванні за допомогою цифрового регулятора з ШІМ модуляцією зі змінним періодом імпульсів по каналу збурення – вихід

Таблиця 3.6. Порівняння інтегральних показників якості розширеної та апроксимованої моделі при регулюванні за допомогою цифрового регулятора з ШІМ модуляцією зі змінним періодом імпульсів по каналу збурення – вихід

| Система               | $I_{\text{лін}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{абс}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{кв}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{швд}}$ | $I_{\text{лін}}^{\text{час}}$ |
|-----------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Розширена система     | -104             | 104                           | 12                           | 3826                          | 12                            |
| Апроксимована система | -118             | 118                           | 14                           | 4942                          | 14                            |

З рисунку 3.9 та таблиці 3.6 видно, що перехідний процеси розширеної системи кращий ніж апроксимованої. З цього випливає, що реальна система буде краще гасити збурення ніж апроксимована і налаштування регулятора забезпечать необхідну якість регулювання.

### 3.4. Розрахунок апроксимованої моделі прецизійної системи регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу на грубість

Розрахуємо апроксимовану модель прецизійної системи регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу на грубість. Розрахунок на грубість потрібен, бо у процесі реальний об'єкт керування може змінюватися. Перевірка системи буде проводитися при варіюванні параметрів об'єкта у діапазоні 10%. На рисунках 3.10-3.12 наведено перехідні процеси при варіації параметрів об'єкту керування. У таблиці 3.7 наведено результати варіації з показниками якості.

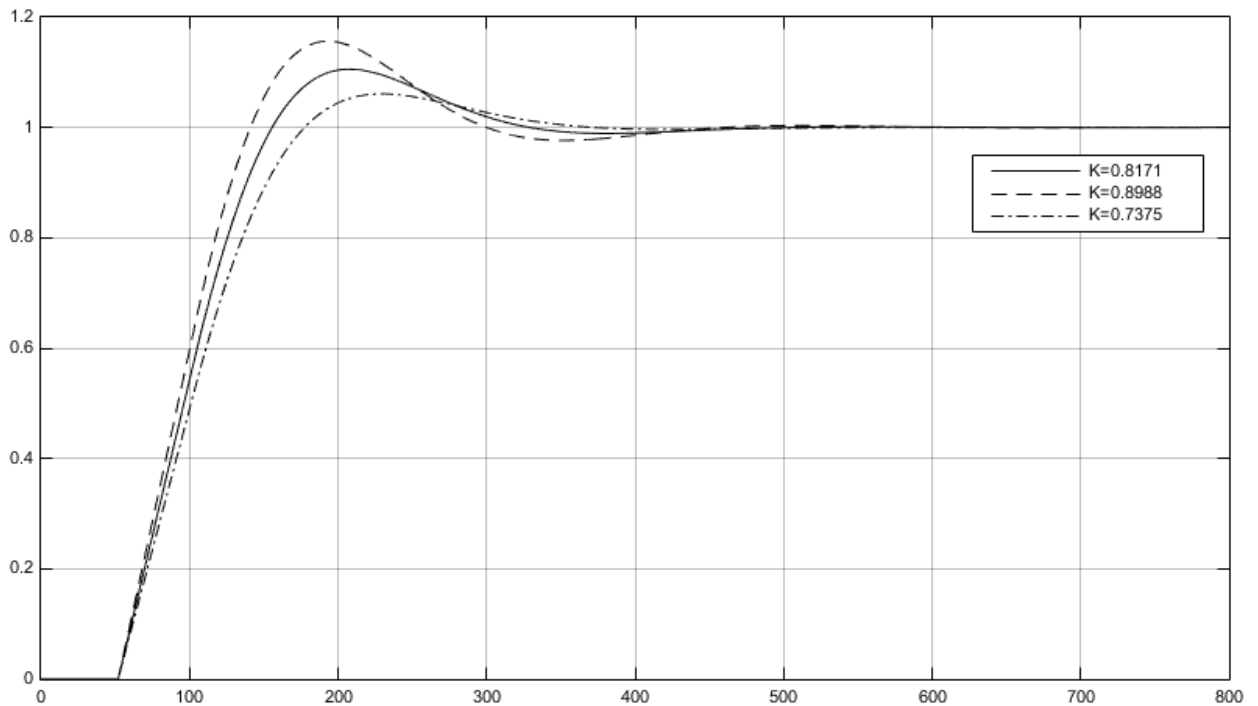


Рис. 3.10. Варіація коефіцієнту передачі об'єкту керування

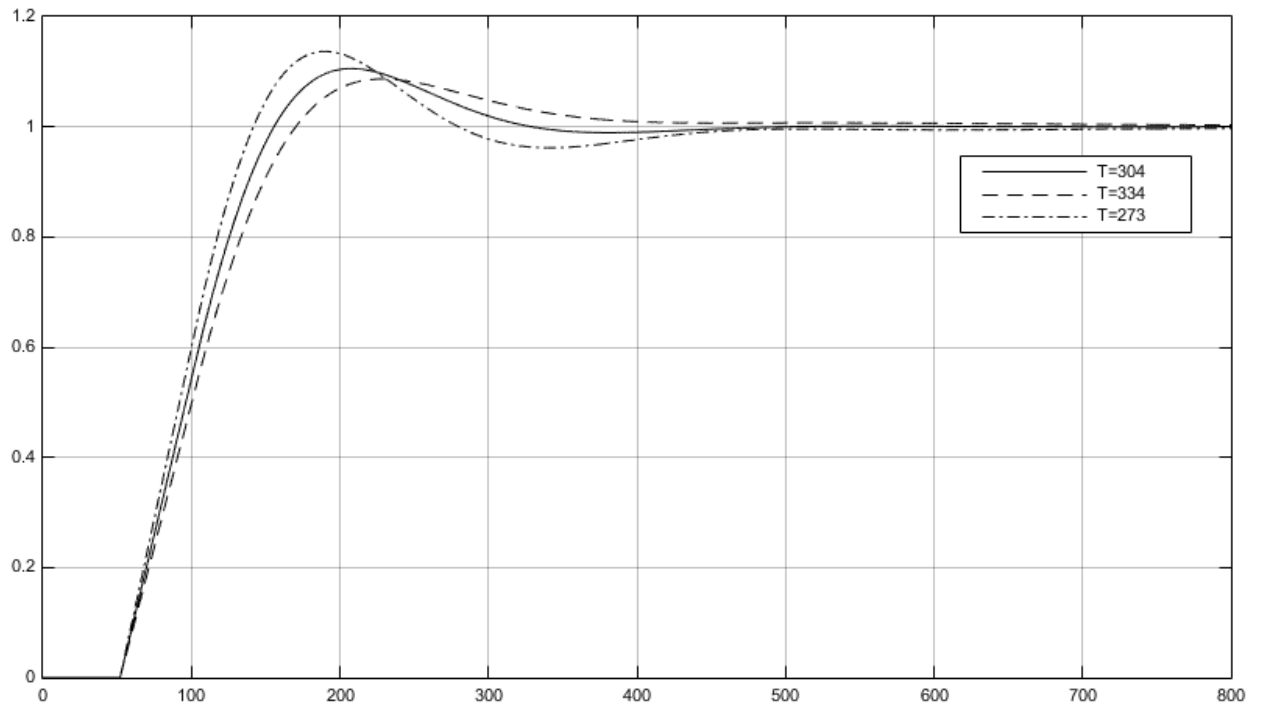


Рис. 3.11. Варіація сталої часу об'єкту керування

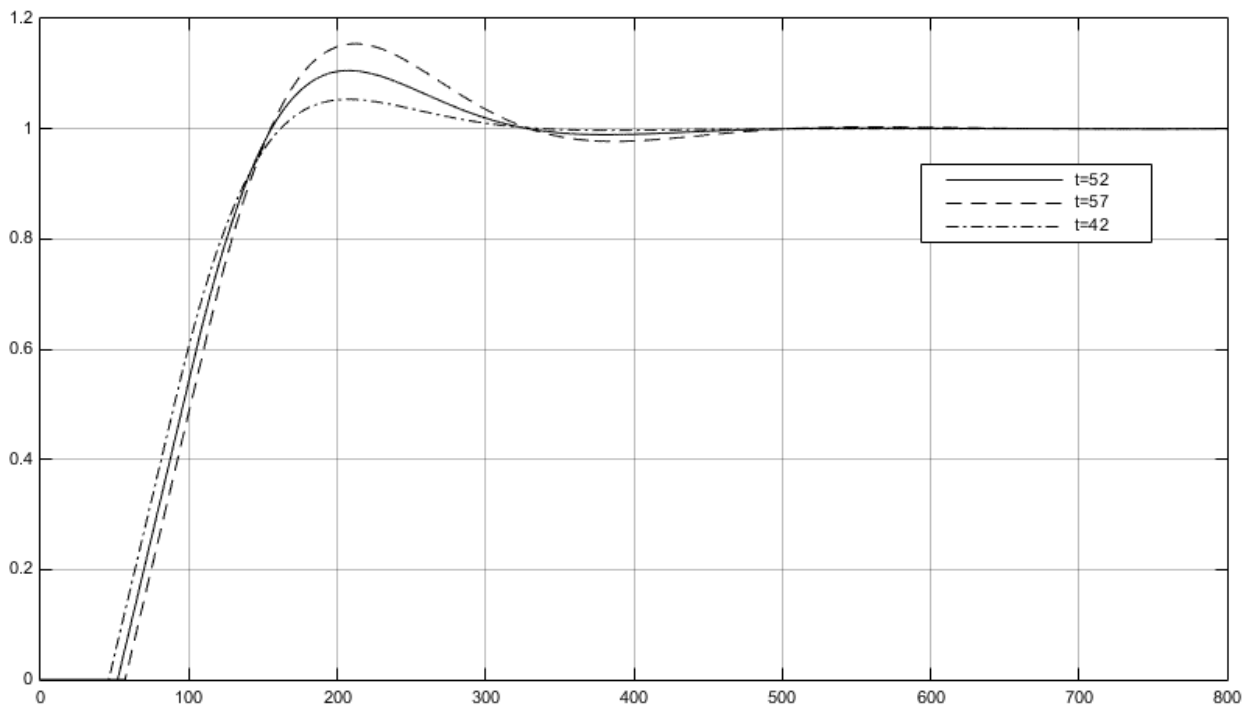


Рис. 3.12. Варіація часу запізнення об'єкту керування

Таблиця 3.7. Варіація параметрів об'єкта керування та показники якості системи регулювання

| Параметри    | $K_{об}$ | $T_{об}$ | $\tau_{об}$ | Динамічне відхилення | Час перехідного процесу |
|--------------|----------|----------|-------------|----------------------|-------------------------|
| Вихідні      | 0,8171   | 304      | 52          | 0,1                  | 500 с.                  |
| $K_{var}$    | 0,7375   | 304      | 52          | 0,06                 | 480 с.                  |
|              | 0,8988   | 304      | 52          | 0,155                | 520 с.                  |
| $T_{var}$    | 0,8171   | 273      | 52          | 0,08                 | 550 с.                  |
|              | 0,8171   | 334      | 52          | 0,136                | 600 с.                  |
| $\tau_{var}$ | 0,8171   | 304      | 46          | 0,147                | 470 с.                  |
|              | 0,8171   | 304      | 57          | 0,053                | 560 с.                  |

На основі таблиці 3.7. побудовано графіки варіації параметрів об'єкта регулювання та показників якості системи регулювання рис. 3.13-3.18.

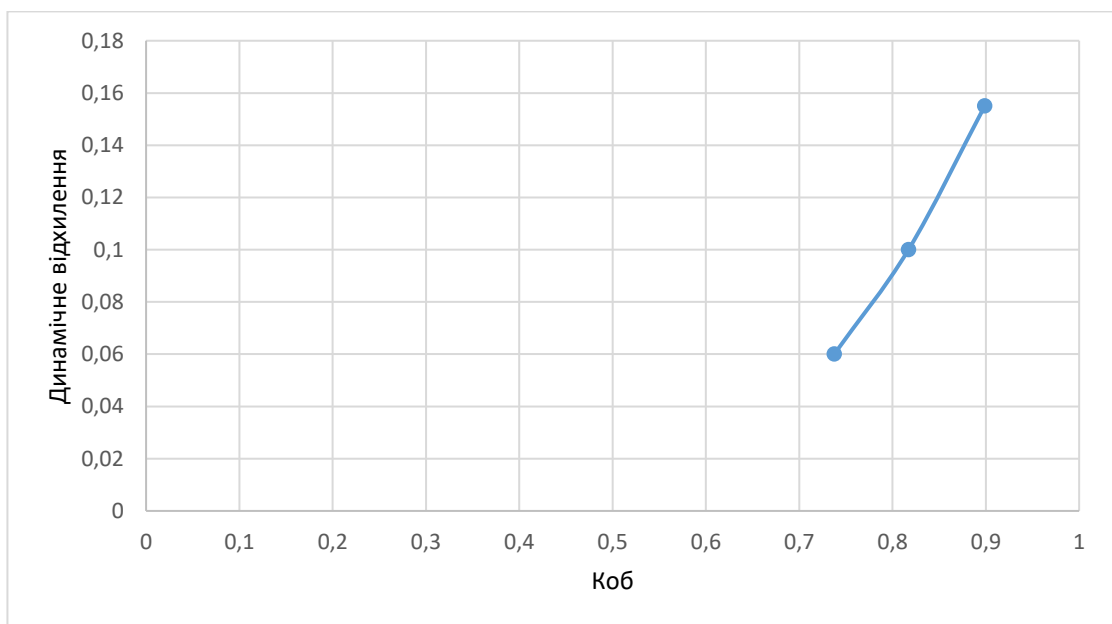


Рис. 3.13. Вплив варіація параметр  $K_{об}$  на динамічне відхилення

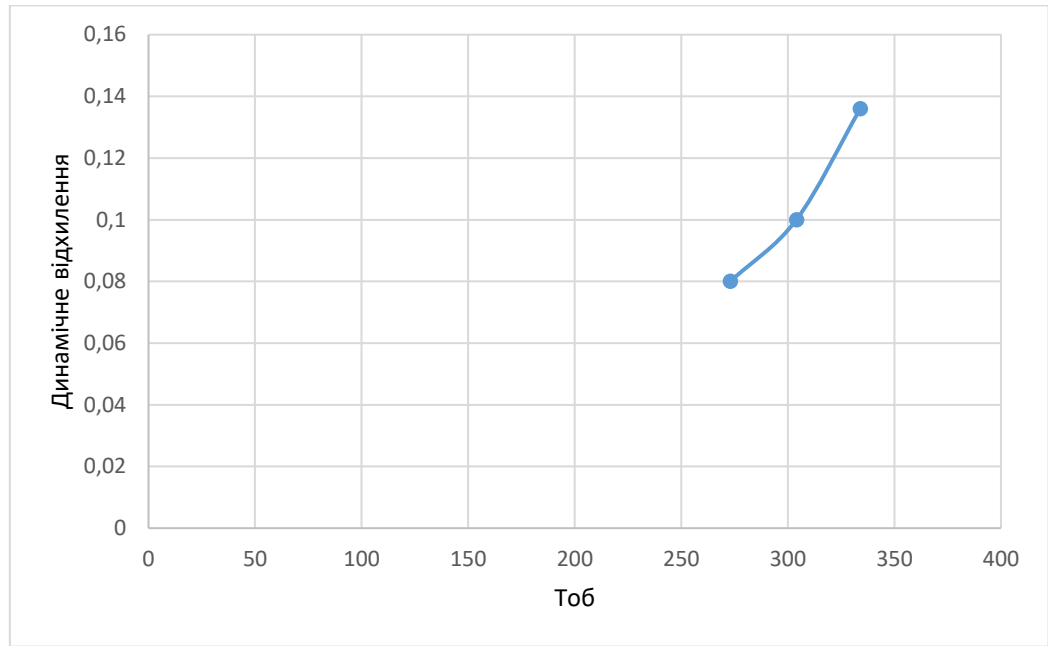


Рис. 3.14. Вплив варіація параметр  $T_{об}$  на динамічне відхилення

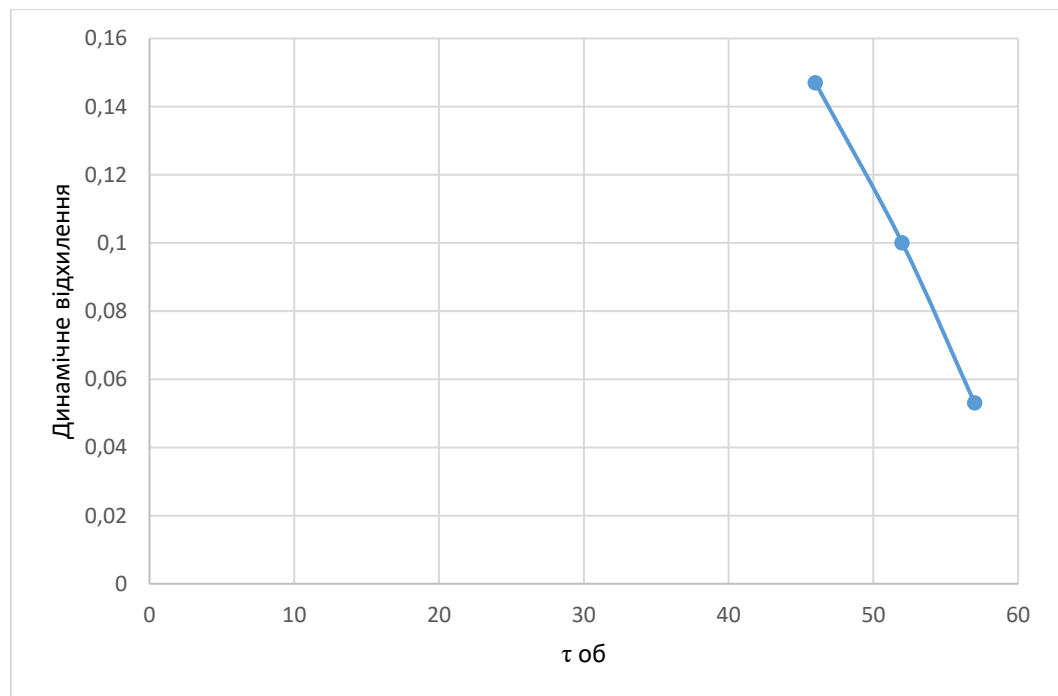


Рис. 3.15. Вплив варіація параметр  $\tau_{об}$  на динамічне відхилення

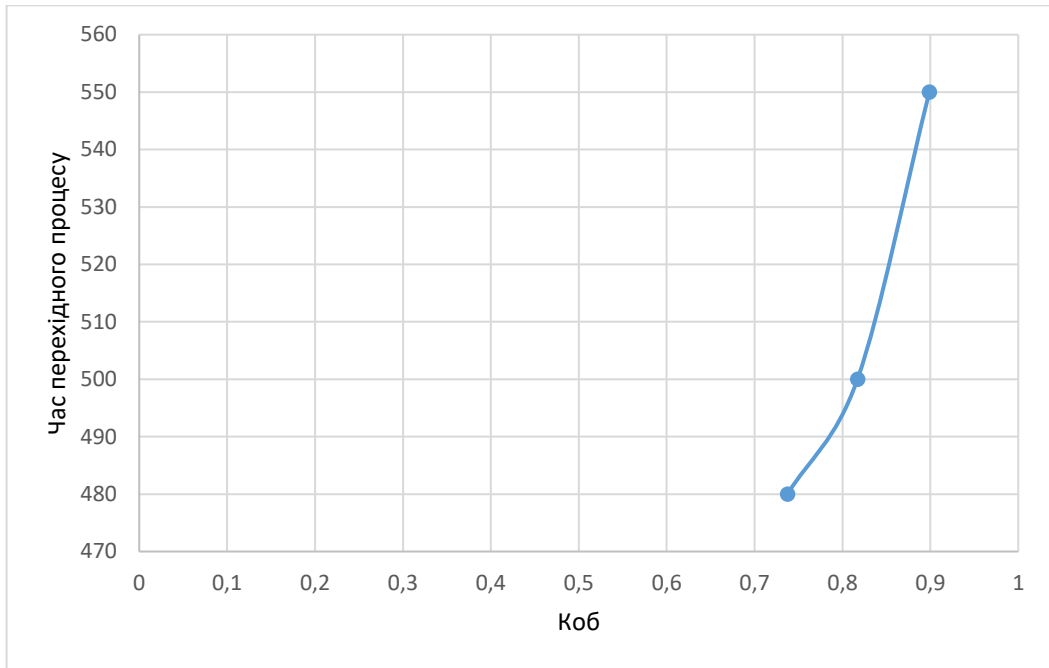


Рис. 3.16. Вплив варіація параметр  $K_{06}$  на час перехідного процесу

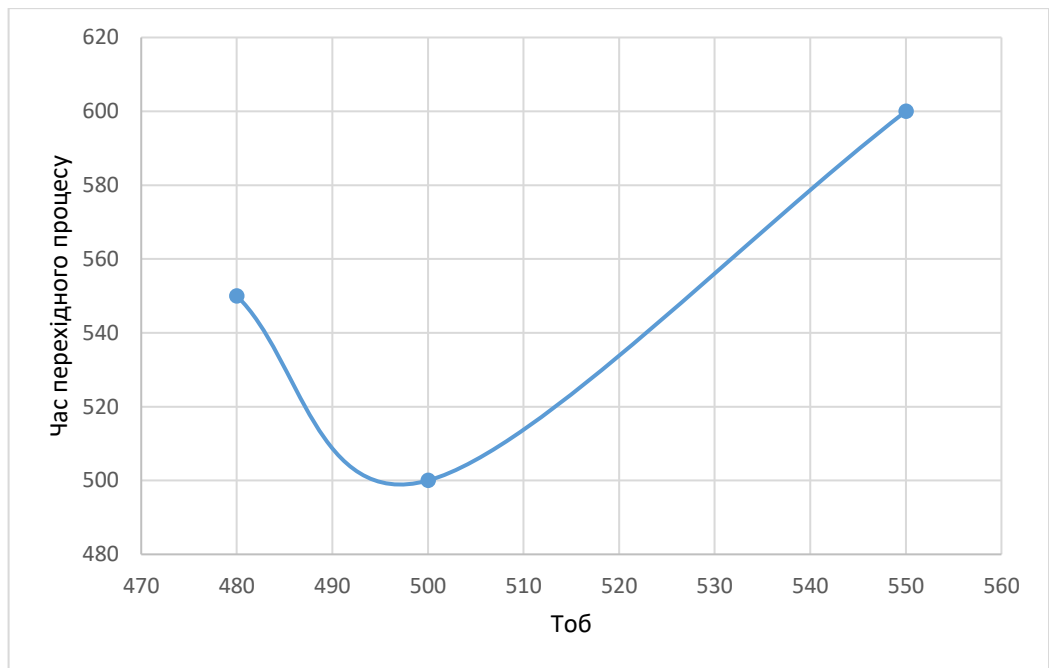


Рис. 3.17. Вплив варіація параметр  $T_{06}$  на час перехідного процесу

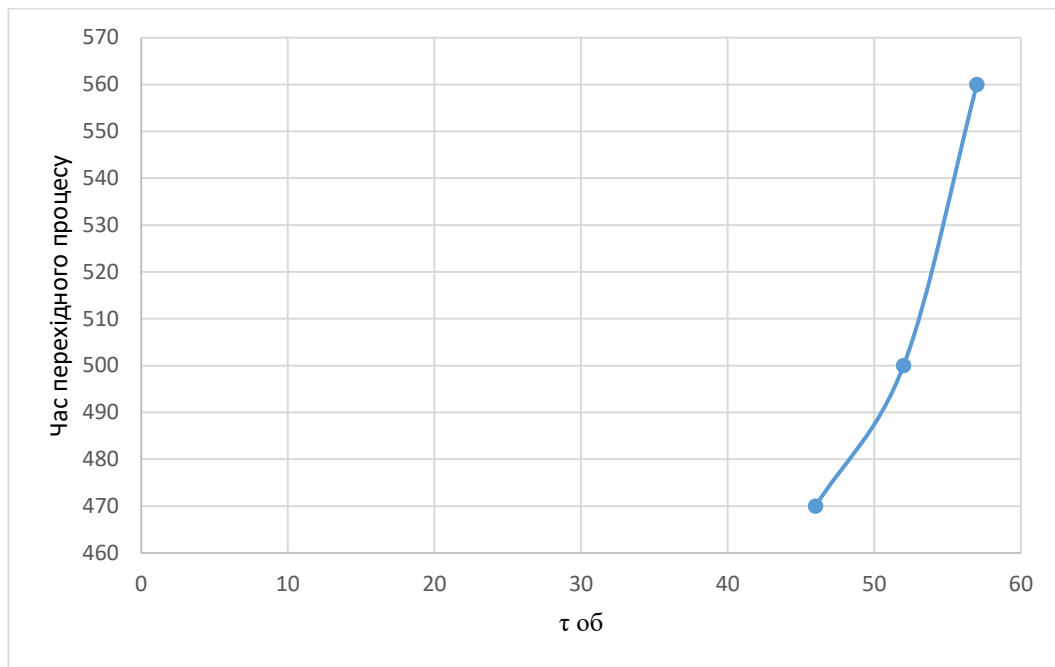


Рис. 3.18. Вплив варіації параметр  $\tau$  на час перехідного процесу

Для подальшого аналізу розрахуємо коефіцієнти чутливості за допомогою формули (3.8):

$$k_z = \left| \frac{\frac{R-R^{opt}}{R^{opt}}}{\frac{z-z^{opt}}{z^{opt}}} \right|, \quad (3.8)$$

де  $k_z$  – відносний коефіцієнт чутливості для параметра  $z$ ;

$z$  – поточний параметр;

$z^{opt}$  – оптимальне значення параметра;

$R, R^{opt}$  – поточний значення критерія якості та відповідне значення при оптимальних параметрах;

При варіації  $K_{об}$  були отримані наступні коефіцієнти чутливості для динамічної похибки:

$$k_{K_{\Delta_{дин}^1}} = 4,1$$

$$k_{K_{\Delta_{дин}^2}} = 5,5$$

При варіації  $T_{об}$  були отримані наступні коефіцієнти чутливості для динамічної похибки:

$$k_{T_{\Delta_{дин}^1}} = 1,9$$

$$k_{T_{\Delta_{дин}^2}} = 3,6$$

При варіації  $\tau$  були отримані наступні коефіцієнти чутливості для динамічної похибки:

$$k_{K_{t_{час}^1}} = 0,55$$

$$k_{K_{t_{час}^2}} = 0,57$$

При варіації  $K_{об}$  були отримані наступні коефіцієнти чутливості для часу перехідного процесу:

$$k_{K_{t_{час}^1}} = 0,41$$

$$k_{K_{t_{час}^2}} = 0,4$$

При варіації  $T_{об}$  були отримані наступні коефіцієнти чутливості для часу перехідного процесу:

$$k_{T_{t_{час}^1}} = 0,98$$

$$k_{T_{t_{час}^2}} = 2$$

При варіації  $\tau$  були отримані наступні коефіцієнти чутливості для часу перехідного процесу:

$$k_{\tau_{t_{час}^1}} = 0,52$$

$$k_{\tau_{t_{час}^2}} = 1,2$$

На основі отриманих коефіцієнтів чутливості можна зробити висновок, що система не груба. З цього випливає, що при зміні параметрів об'єкта керування зміниться якість регулювання. Грубість системи обумовлюється тим що апроксимована система отримана на основі розширеної системи, яка складається з лінійних моделей.

## 4. РІШЕННЯ З АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРЕЦИЗІЙНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ БАГАТОЦІЛЬОВОГО СКЛАДУ

### 4.1. Технічні рішення з контролю та регулювання прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу

Щоб прецизійна система підтримання температурного режиму багатоцільового складу рис. 4.1 працювала необхідно вимірювати і регулювати технічні параметри. Якщо яексь значення не відповідає номінальному, то система працює некоректно.

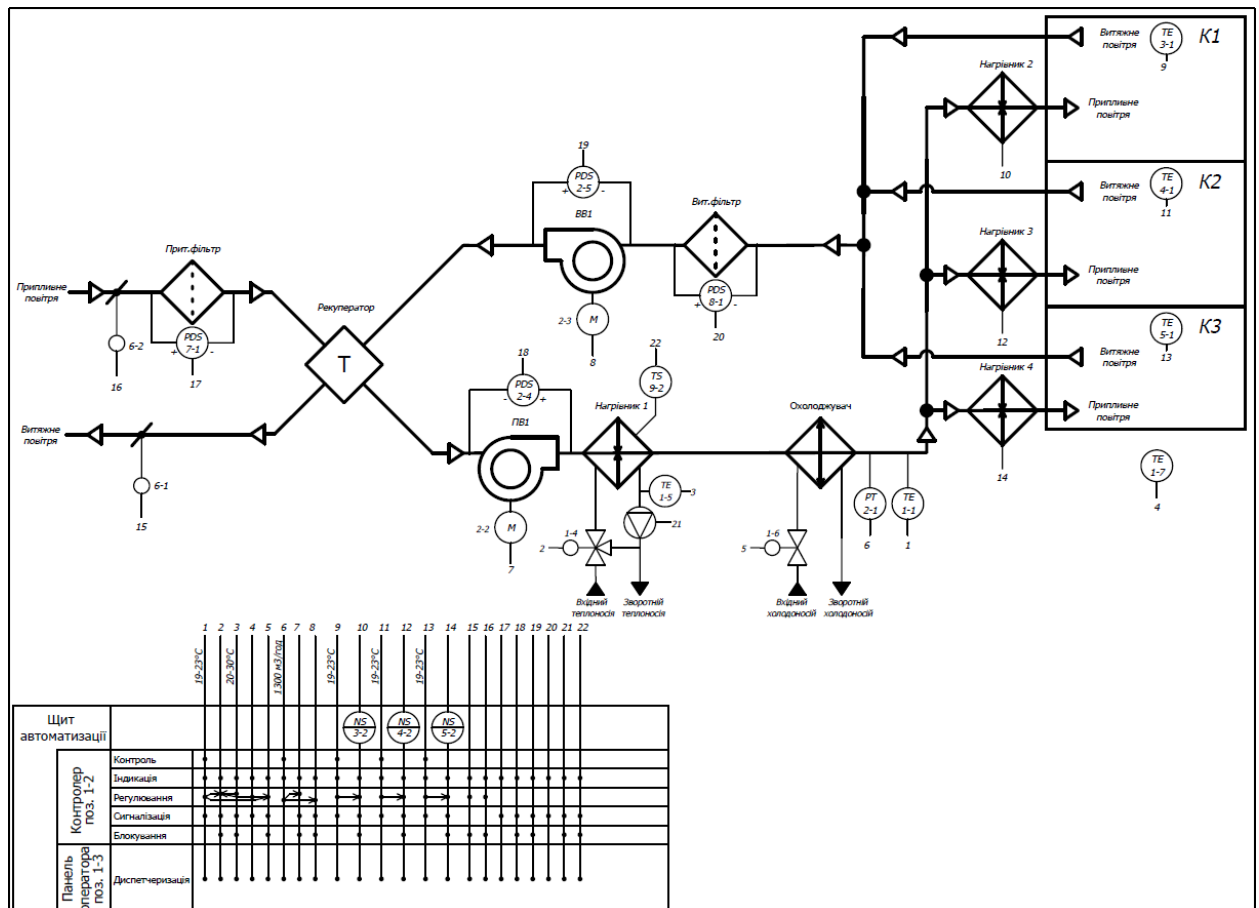


Рис. 4.1. Функціональна схема прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу

Для номінальної роботи прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу контролюються такі параметри:

- Температуру припливного повітря (позиція 1-1). Вимірювання проводяться за допомогою термоопору TF43 NTC10K.
- Витрату припливного повітря (позиція 2-1). Вимірювання проводяться за допомогою датчику тиску DPT-FLOW.
- Температуру у приміщеннях (позиції 3-1, 4-1, 5-1). Вимірювання проводяться за допомогою термоопору RTF1 NTC10K.
- Температуру зовнішнього повітря (позиція 1-7). Вимірювання проводяться за допомогою термоопору TF43 NTC10K.
- Перепад тиску на притяжному і витяжному вентиляторах (позиції 2-4, 2-5). Контроль проводиться за допомогою пресостату PS500 B.
- Перепад тиску на притяжному і витяжному фільтрах (позиції 7-1, 8-1). Контроль проводиться за допомогою пресостату PS500 B.
- Температуру зворотного теплоносія водяного нагрівника (позиція 1-5). Вимірювання проводяться за допомогою термоопору ETF6 NTC10K.
- Замерзання водяного нагрівника (позиція 9-2). Контроль проводиться за допомогою термостату загрози замерзання FST-1D.

Для номінальної роботи прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу виконується керування такими виконавчими механізмами:

- Керування продуктивністю водяного нагрівника відбувається за допомогою приводу шарового клапану LR24A-SR (позиція 1-4).
- Керування продуктивністю охолоджувача відбувається за допомогою приводу шарового клапану LR24A-SR (позиція 1-6).

- Керування витратою повітря здійснюється за допомогою вбудованого частотного перетворювача у притяжному та витяжному вентиляторах ВКПФИ 4Д (позиції 2-2, 2-3).
- Керування продуктивністю електричних нагрівачів відбувається за допомогою напівпровідникових реле RGC2P60V25C1DM (позиції 3-2, 4-2, 5-2).

#### **4.2. Реалізація програмного керування прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу**

Для прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу був обраний контролер EVCO Node kilo+. EVCO Node kilo — це серія програмованих контролерів з великою кількістю протоколів зв'язку та вводу-виводу, придатних для широкого кола застосувань. Програмне забезпечення може бути розроблене інтуїтивно зрозумілим завдяки інтегрованому середовищу розробки Uni-Pro 3. Порт Ethernet з вбудованим веб-сервером забезпечує доступ браузера до сторінок HTML розробленої програми, а одночасна наявність двох RS-485 робить можливим спільне використання таких протоколів зв'язку, як MODBUS TCP, MQTT, BACnet. Ці функції полегшують зв'язок між пристроями та їх використання в системах управління та обслуговування, як на місці, так і віддалено. Функція реєстрації даних дозволяє записувати до 32 змінних для полегшення моніторингу пристрою та відстеження даних. Порти USB та Ethernet дозволяють перепрограмувати, завантажувати та налагоджувати прикладне програмне забезпечення на місці або віддалено, таким чином спрощуючи введення в експлуатацію та подальшу діагностику.

Програма керування цифровою системою регулювання була написана на мові FBD та C. Керування підтриманням температури у складському приміщенні здійснюється за допомогою ШІМ з змінним періодом імпульсів, яка керує потужністю доводчика температури, тобто електрокалорифером. На

рис. 4.2 показана програма керування системою регулювання температури у складському приміщенні.

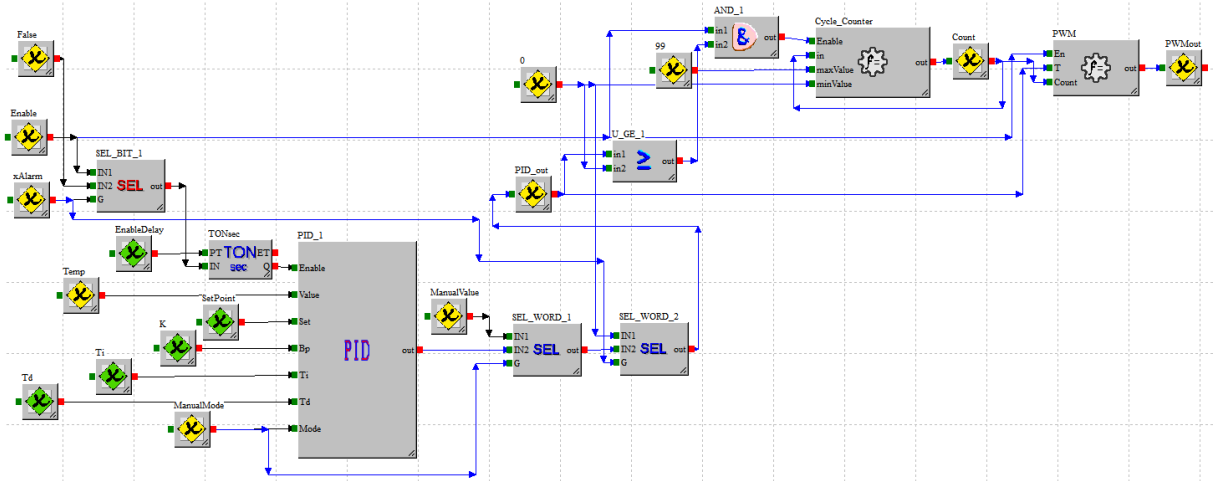


Рис. 4.2. Програма керування системою регулювання температури у складському приміщенні

У даній програмі наявний ПІД регулятор, який має період дискретизації 10 секунд, блок лічильника, блок ШІМ та допоміжні блоки для коректної роботи програми та обробки аварій. Функція лічильника і функція ШІМ реалізують керування ШІМ модуляцією. Лічильник рахує від 0 до 100 за 10 секунд, тобто додає значення кожні 0,1 секунду. У функції ШІМ порівнюється значення з лічильника та значення виходу ПІД регулятора. Якщо значення з лічильника більше за значення виходу ПІД регулятора то на виході блоку ШІМ буде 0, а якщо значення лічильника менше за значення виходу ПІД регулятора – то 1. Таким реалізується ШІМ модуляція зі змінною тривалістю імпульсу.

Код функції лічильника:

```

if (Enable)
{
    if (in >= maxValue)
    {
        return minValue;
    }
    else

```

```

    {
        return in+1;
    }
}
else
{
    return 0;
}

```

Код функції ШІМ:

```

if (En)
{
    if (Count < T)
    {
        return 1;
    }
    else
    {
        return 0;
    }
}
else
{
    return 0;
}

```

Також у даній програмі наявна затримка на ввімкнення, щоб не спалити електрокалорифер при ввімкненні системи. Наявна обробка аварій: при наявності аварії електрокалорифера електрокалорифер відключається.

### **4.3. Інформаційно аналітична система управління прецизійною системою підтримання температурного режиму багатоцільового складу**

Для прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу була обрана панель оператора myPANEL. Дане рішення від mySCADA включає в себе людино-машинний інтерфейс та панель оператора. Панель оператора поставляється з необмеженою на кількість тегів

ліцензією. Також у даної системи диспетчеризації наявний web сервер, тобто є можливість віддаленого керування та моніторингу.

На рисунку 4.3 наведене головне вікно людино-машинного інтерфейсу прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу.

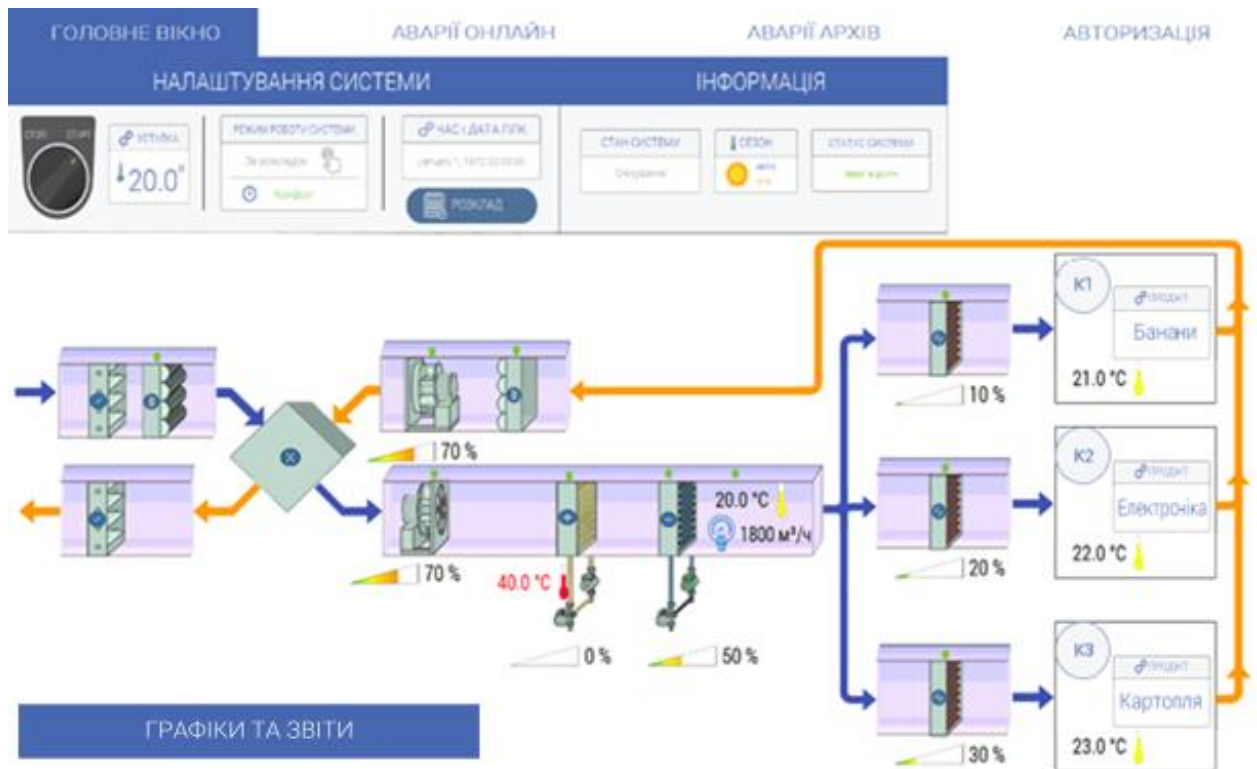


Рис. 4.3. Головне вікно людино-машинного інтерфейсу прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу

На головному вікні здійснюється керування і моніторинг системою прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу. На даному вікні можна керувати підготовкою повітря. Для складських приміщень задається тип зберігаємої продукції, тобто система диспетчеризації задає температурну уставку приміщення в залежності від зберігаємої продукції. Також відображаються аварії обладнання рис. 4.4 та можна переглянути графіки параметрів системи та згенерувати звіт.

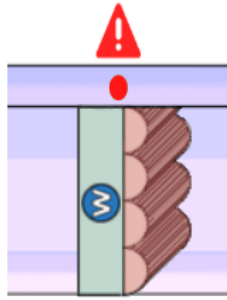


Рис. 4.3. Відображення аварії притяжного фільтра

Крім головного вікна наявне вікно аварій онлайн та аварій архів. У вікні аварій онлайн відображаються усі поточні аварії, а у вікні аварій архів відображаються аварії, які були. З цих двох вікон можна зберігати список аварій у PDF форматі.

У системі диспетчеризації наявні декілька користувачів з різним рівнем доступу, тобто стороння людина не зможе керувати системою. Графіки температури та витрати, як і аварії можна зберігати. Також для зручності персоналу можна згенерувати та зберегти звіт з підказками для покращення показників системи. Система аналізує процес та при згоді оператора може оптимізувати параметри. Аналізуються параметри температури каналу підготовки та потужність роботи обладнання. Дана система допомагає обслуговуючому персоналу слідкувати та керувати прецизійною системою підтримання температурного режиму багатоцільового складу.

## 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ

### 5.1. Опис ідеї проєкту

Сама назва стартап походить від англійського словосполучення "start up", що в перекладі означає запускати. Стартапом називають щойно запущений проєкт чи той, що перебуває у процесі запуску. Обов'язковою умовою є наявність бізнес-ідеї. Стартап проєкти мають бути затребуваними. Розвиток ідеї та її реалізація мають цікавити цільову аудиторію. Щоб представляти інтерес для цільової групи, проєкту не обов'язково бути комерційним. Навіть науково-технічні, дослідні чи інформаційні проєкти мають право життя, якщо представники соціуму зацікавлені у них.

Ідея стартап-проєкту, варіанти її застосування та вигоди користувача наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Ідея стартап-проєкту

| Ідея                                                                                     | Застосування                                                                                                  | Вигоди                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Розроблення прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу | Створення системи автоматизації або повна заміна вже встановленого системи автоматизації                      | Отримання сучасної системи автоматизації                                                             |
|                                                                                          | Часткове оновлення системи автоматизації: оновлення засобів автоматизації та інформаційно аналітичної системи | Заміна застарілих засобів автоматизації на сучасні, розроблення інформаційно аналітичної системи     |
|                                                                                          | Часткове оновлення системи автоматизації: оновлення інформаційно аналітичну систему                           | Розроблена інформаційно аналітична система для керування та моніторингу, як по місцю так і віддалено |

Переваги ідеї в порівнянні з конкурентами наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

| Техніко-економічні характеристики ідеї | Концепції конкурентів                    |                                           |                                           | W<br>(слабка сторона) | N<br>(нейтральна сторона) | S<br>(сильна сторона) |
|----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
|                                        | Мій проект                               | Aerostar                                  | Certa                                     |                       |                           |                       |
| Інформаційно-аналітична система        | Наявне                                   | Наявне                                    | Наявне                                    |                       | +                         |                       |
| Надійність обладнання                  | Обладнання з високим ступенем надійності | Обладнання з середнім ступенем надійності | Обладнання з середнім ступенем надійності |                       |                           | +                     |
| Ціна                                   | Середня ціна                             | Висока ціна                               | Висока ціна                               |                       |                           | +                     |

## 5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту наведено у таблиці 5.3. Відповідно з таблиці 5.3 видно, що ідея проекту є технологічно здійсненною.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

| Ідея проекту                                                                 | Технології її реалізації                                                            | Наявність технологій | Доступність технологій    |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------|
| Прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу | ПЛК, датчики температури, тиску, витрати, напівпровідникові реле, електрокалорифери | Наявна технологія    | Загальноживані технології |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                         |                   |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------|
| Інформаційно аналітична система                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Система диспетчеризації | Наявна технологія | Загальноживані технології |
| Обрана технологія реалізації ідеї проекту: для реалізації прецизійної системи підтримання температурного режиму багатоцільового складу застосовуватимуться ПЛК датчики температури, тиску, витрати, напівпровідникові реле, електрокалорифери; для реалізації інформаційно аналітичної системи використовуватиметься система диспетчеризації. |                         |                   |                           |

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

У таблиці 5.4 визначаються ринкові можливості, які використовуватимуться під час ринкового впровадження проекту, ринкових загроз, які можуть бути перешкодою.

Через те, що кількість компаній не дуже велика, ринок подібних систем зростає і рентабельність перевищує відсоток на вкладення, впливає, що за попередніми оцінками ринок є привабливим для входження.

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

| Показники стану ринку                                   | Характеристика |
|---------------------------------------------------------|----------------|
| Кількість головних гравців, од                          | 5              |
| Динаміка ринку (якісна оцінка)                          | Зростає        |
| Наявність обмежень для входу                            | Відсутні       |
| Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації     | Відсутні       |
| Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), % | 46%            |

У таблиці 5.5 наведено потенційні групи клієнтів та формуються вимоги до проекту.

Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| Потреба                    | Клієнти                                          | Відмінності клієнтів           | Вимоги до проекту                               |
|----------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|
| Якісна та недорога система | Склади, які потребують якісну систему вентиляції | Вимоги до надійності, вартості | Необхідність у інформаційно аналітичній системі |

У таблицях 5.6 та 5.7 наведено фактори загроз та фактори можливостей стартап-проекту.

Таблиця 5.6. Фактори загроз

| Фактор                                                  | Зміст загрози                                                                | Можлива реакція компанії                                 |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Нерозуміння важливості інформаційно аналітичної системи | Замовники можуть не розуміти навіщо потрібна інформаційно аналітична система | Обґрунтувати важливість інформаційно аналітичної системи |

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

| Фактор             | Зміст можливості                                       | Можлива реакція компанії                                                         |
|--------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Надійність системи | Система з надійними датчиками, виконавчими механізмами | Впровадження для об'єктів з високими вимогами до якісного та надійного керування |

У таблиці 5.8 наведено аналіз конкуренції на ринку.

Таблиця 5.8. Аналіз конкуренції на ринку

| Особливості конкурентного середовища                  | В чому проявляється дана характеристика                      | Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною) |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Тип конкуренції – чиста конкуренція                   | Немає високого порогу для входу                              | Участь в тендерах, презентація проекту                                                 |
| Рівень конкурентної боротьби – національний           | Необхідність присутності частини команди при розгортанні.    | Просувати проект по усій країні                                                        |
| Конкуренція за галузевою ознакою – внутрішньогалузева | Проекти з інших галузей не задовольняють замовників          | Обґрунтувати переваги перед конкурентами                                               |
| Конкуренція за видами товарів – товаро-видова         | Конкуренція з проектами, що пропонують автоматичне керування | Обґрунтувати свої переваги перед конкурентами                                          |
| Конкуренція за видами конкурентних переваг – цінова   | Конкуренція залежить від ціни                                | Закупівля необхідного обладнання партіями для зниження ціни                            |
| Конкуренція за інтенсивністю - марочна                | Пропонуються схожі функції                                   | Покращення пропонуємих функцій та впровадження нових                                   |

Проведемо більш детальний аналіз за допомогою моделі 5 сил М. Портера таблиця 5.9.

Згідно з таблиці 5.9 у проєкту є всі шанси гідно конкурувати на ринку. Для покращення конкурентоспроможності необхідно презентувати проєкт на тендерах та виставках.

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

|                  | Прямі конкуренти в галузі         | Потенційні конкуренти                                                                      | Постачальники                                   | Клієнти                                          | Товари-замінники                                              |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Складові аналізу | Aerostar, Certa                   | Низький поріг для входження в галузь                                                       | Встановлення ціни, кількості товару             | Контроль якості                                  | Відсутні                                                      |
| Висновки         | Середня інтенсивність конкурентів | Немає серйозних перешкод для виходу на ринок, немає інформації про потенційних конкурентів | Постачальники диктують ціну та кількість товару | Клієнти диктують вимоги згідно умов експлуатації | Обмеження для роботи на ринку через товари-замінники відсутні |

У таблиці 5.10 наведені фактори конкурентоспроможності на основі таблиць 5.2, 5.5, 5.6 та 5.7.

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| Фактор конкурентоспроможності | Обґрунтування                                                                                 |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ціна                          | У конкурентів вища ціна                                                                       |
| Надійне обладнання            | У проєкті використовується високоякісне, надійне обладнання, яке не використовують конкуренти |

Аналіз сильних та слабких сторін проєкту наведено у таблиці 5.11 на основі факторів конкурентоздатності.

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Бали 1-20 | Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з даним стартапом |    |    |   |    |    |    |  |
|-------|-------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------|----|----|---|----|----|----|--|
|       |                               |           | -3                                                         | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |  |
| 1     | Ціна                          | 20        | +                                                          |    |    |   |    |    |    |  |
| 2     | Надійне обладнання            | 19        |                                                            | +  |    |   |    |    |    |  |

Останнім етапом аналізу є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі таблиці 5.11.

Ринкові загрози та можливості беруться на основі факторів маркетингового середовища. Загрози та можливості на ринку – це вплив

факторів ще не реалізованих на ринку і мають ймовірність здійснитися. SWOT-аналіз наведений у таблиці 5.12.

Таблиця 5.12. SWOT - аналіз стартап-проєкту

|                                                                                                                  |                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Сильні сторони:</b></p> <p>Ціна</p> <p>Надійне обладнання</p>                                              |                                                                      |
| <p><b>Можливості:</b></p> <p>Зростання ринку</p> <p>Розуміння замовників у інформаційно аналітичних системах</p> | <p><b>Загрози:</b></p> <p>Створення конкурентами схожих проєктів</p> |

На основі таблиці 5.12 запишемо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проєкту на ринок та орієнтовний час їх реалізації з огляду на конкурентів, що можуть з'явитися таблиця 5.13.

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

| № п/п | Альтернатива ринкової поведінки                                                 | Ймовірність отримання ресурсів | Терміни реалізації |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| 1     | Орієнтація даного проєкту на ринок державних підприємств великих міст           | 70%                            | 4 міс.             |
| 2     | Орієнтація даного проєкту та ринок приватних підприємств великих міст           | 80%                            | 3 міс.             |
| 3     | Орієнтація даного проєкту на ринок державних підприємств середніх та малих міст | 60%                            | 3 міс.             |
| 4     | Орієнтація даного проєкту та ринок приватних підприємств середніх та малих міст | 55%                            | 3 міс.             |

Згідно наведених вище даних орієнтація проєкту націлена на орієнтацію на приватні підприємства великих міст, бо вищі шанси отримання ресурсів і є менші терміни менші.

#### 5.4. Розроблення ринкової стратегії проєкту

Для розробки ринкової стратегії визначимо стратегії охоплення ринку та потенційних замовників у таблиці 5.14.

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних замовників

| Опис профілю цільової групи потенційних замовників                 | Готовність замовників сприйняти продукт | Орієнтовний попит в мережах цільової групи (сегменту) | Інтенсивність конкуренції в сегменті | Простота входу в сегмент |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| Власники великої мережі підприємств                                | Потребують недовгих переговорів         | Вище середнього                                       | Нижче середньої                      | Нескладно                |
| Власники локального підприємства                                   | Потребують переговорів                  | Середній                                              | Низька                               | Нескладно                |
| Які цільові групи обрано: Власники великих і локальних підприємств |                                         |                                                       |                                      |                          |

За даними таблиці 5.14 була обрана стратегію диференційованого маркетингу, бо робота проводитиметься з декількома сегментами.

У таблиці 5.15 сформована базова стратегія розвитку. У таблиці 5.16 наведена стратегія конкурентів.

Таблиця 5.15. Базової стратегія розвитку

| Обрана альтернатива розвитку проєкту | Стратегія охоплення ринку | Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи | Базова стратегія розвитку |
|--------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|                                      |                           |                                                                        |                           |

|                                                                       |                                        |                                                                                                                            |                         |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Орієнтація даного проекту та ринок приватних підприємств великих міст | Стратегія диференційованого маркетингу | Приватні підприємства великих міст мають потребу у інформаційно аналітичній системі та високі вимоги до надійності системи | Стратегія диференціації |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|

На основі таблиць 5.5, 5.15 та 5.16 створена стратегія позиціонування, яка формує ринкову пропозицію за якою замовники можуть знайти проект таблиця 5.17.

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

|                                        |                                                                                |                                                                             |                                     |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Чи є проект «першопрохідцем» на ринку? | Чи буде компанія шукати нових замовників, або забирати існуючих у конкурентів? | Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які? | Стратегія конкурентної поведінки    |
| Ні                                     | Так, буде                                                                      | Якщо у конкурентів, є кращі ідеї                                            | Стратегія заняття конкурентної ніші |

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування

|                                     |                           |                                                              |                                                                           |
|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Вимоги до товару цільової аудиторії | Базова стратегія розвитку | Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту | Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту |
|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|

|    |           |                                  |                                     |
|----|-----------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Ні | Так, буде | Якщо у конкурентів, є кращі ідеї | Стратегія заняття конкурентної ніші |
|----|-----------|----------------------------------|-------------------------------------|

### 5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Створимо маркетингову концепцію для замовника. Переваги концепції потенційного товару наведені у таблиці 5.18.

Таблиця 5.18. Ключові переваги концепції потенційного товару

| № п/п | Потреба               | Вигода, яку пропонує товар                                          | Ключові переваги перед конкурентами                        |
|-------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 1     | Ціна                  | Менша ціна системи                                                  | У конкурентів ціна вища                                    |
| 2     | Надійність обладнання | У системі використовується обладнання з високим ступенем надійності | Обладнання має вищу надійність у порівнянні з конкурентами |

Визначимо цінові межі на товар, дані наведено у таблиці 5.19, за допомогою експертного методу.

Таблиця 5.19. Межі встановлення ціни

| Рівень ціни на товари-замінники | Рівень-цін на товари-аналоги | Рівень доходів цільової групи споживачів | Верхня та нижня межа встановлення ціни на товар |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 25000-55000 грн.                | 35000-75000 грн.             | 4500-35000 грн.                          | 110000-350000 грн.                              |

У таблиці 5. 20 наведено оптимальну систему збуту.

Таблиця 5.20. Система збуту

|                                                     |                                                       |                       |                          |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів | Функції збуту, які має виконувати постачальник товару | Глибина каналу збуту  | Оптимальна система збуту |
| Закупівля у постачальників за допомогою тендера     | Витримування термінів поставок та якості обладнання   | Зустріч з замовниками | Збут через тендери       |

Останнім кроком розробимо концепцію маркетингових комунікацій, що спиратиметься на попередньо обрану основу для позиціонування та визначену специфіку поведінки клієнтів. Результати наведені у таблиці 5.21.

Таблиця 5.21. Системи збуту

|                                                   |                                                        |                                                                                         |                                                              |                                |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Специфіка поведінки цільових клієнтів             | Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти | Ключові позиції, обрані для позиціонування                                              | Завдання рекламного повідомлення                             | Концепція рекламного звернення |
| Влаштування тендеру, для отримання ліпшого товару | Телефон, електронна пошта, месенджери                  | Прецизійна система регулювання підтримання температурного режиму багатоцільового складу | Обґрунтувати замовнику необхідність даного проєкту для нього | Показ можливостей проєкту      |

У цьому розділі проведено технологічний аудит ідеї проєкту, який показав, що проєкт є технологічно здійснений і має переваги перед конкурентами і є конкурентоздатним.

Ринкова стратегія проєкту передбачає цільову аудиторію великих та локальних підприємств великих містах України. Використовуватиметься стратегія диференційованого маркетингу для охоплення ринку.

Розроблено маркетингову програму з перевагами над конкурентами з діапазоном цін проєкту, система збуту буде проводитися через тендери. Реклама проєкту націлена на обґрунтування замовнику необхідність даного проєкту для нього.

## ВИСНОВОК

У магістерській дисертації були розглянуті припливно-витяжні системи вентиляції та їх обладнання, багатозональні системи, каскадні системи керування. Також були розглянуті математичні моделі електрокалорифера та приміщення. На основі розглянутих математичних моделей була створена динамічна модель складського приміщення. Динамічна модель складського приміщення складається з електрокалорифера, повітропроводу та приміщення. Для отримання передаточних функцій складського приміщення було проведене моделювання у Simulink з апроксимацією перехідних процесів. На основі отриманих передаточних функцій була розрахована та порівняна цифрова система з ШІМ модуляцією зі змінним періодом імпульсів та аналогова система підтримання температури складського приміщення на базі ПІ регулятора. Прецизійна система підтримання температури складського приміщення розраховувалась на відпрацювання зміни уставки. У підсумку аналогова система виявилась кращою, але цифрова система з ШІМ модуляцією зі змінним періодом імпульсів відповідала усім вимогам, тому була обрана як оптимальна. Для прецизійної системи підтримання температури складського приміщення було розроблено програму керуванням електрокалорифером з ШІМ модуляцією зі змінним періодом імпульсів для ПЛК EVCO Node kilo+ у середовищі Uni Pro 3. У програмі керування електрокалорифером була розроблена ШІМ модуляція зі змінним періодом імпульсів на мові С. Для Прецизійної системи підтримання температури багатофункціонального складу розроблена інформаційно-аналітична система на базі панелі оператора myPANEL від mySCADA. За допомогою інформаційно-аналітичної системи можна слідкувати та керувати, а також генерувати звіти з аналітикою прецизійної системи підтримання температури багатофункціонального складу. Інформаційно-аналітичною системою можна користуватися як по місцю так і віддалено завдяки вбудованому web серверу. Для прецизійної системи підтримання температури багатофункціонального складу був розроблений

стартап проєкт. У підсумку була створена надійна конкурентоспроможна система автоматичного керування, яка матиме попит у великих та локальних підприємствах великих міст України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Голінко І. М., Галицька І.Є. Динамічна модель теплообміну для водяного калорифера у просторі станів // Інформаційні системи, механіка та керування. Київ – 2016. № 15, – С. 83–92.
2. Голінко І.М., Галицька І.Є. Промислове приміщення як динамічний елемент системи керування штучним мікрокліматом // Інформаційні системи, механіка та керування. Київ – 2018. № 18, С. 30–38.
3. Бондарь Е.С., Гордиенко А.С. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Київ: ТОВ «Видавничий будинок «Аванпост-Прим», 2005. 560 с.
4. Белова Е.М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях/Е.М. Белова – М.: Евроклимат, 2006. – 640с.
5. Богословский В.Н. и др. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: Учебник для вузов / В. Н. Богословский, О. Я- Кокорин, Л. В. Петров; Под ред. В. Н. Богословского.— М.: Стройиздат, 1985.— 367 с.
6. Лігоцький А.О., Голінко І.М. Динамічна модель електрокалорифера для виробничого приміщення: тези XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, м. Київ, 20-23 квітня 2021 р. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – Т. 2 – 24 с.
7. Голинко И.М., Ладанюк А.П., Кубрак А.И. Инженерный метод оптимизации цифровых систем управления // Проблемы управления и информатики. –2014, №1. –С. 80–87.
8. Aidan O`Dwyer, Handbook\_of\_PI\_and\_PID\_Controller\_Tuning\_Rules, Ireland: Imperial College Press, 2009. – 608 с.
9. Остапенко Ю. О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування: Підручник для студентів вищих закладів освіти, що навчаються

за напрямком «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – К.: Задруга, 1999. – 424 с.

10. Стефанов Е. В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Издавництво «АВОК Северо-Запад», 2005 — 402 с.
11. Родин А.К. Вентиляция производственных зданий. Учебное пособие. — Саратовский государственный технический университет, 1997 121 с.
12. В. Ананьев и др. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика. Издавництво Евроклимат, 2001 — 416 с.
13. Лігоцький А. О. Автоматизація температурного режиму мультizonального складу: робота на здобуття ступеня бакалавра: Київ, 2020. – 78 с.