

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПм-06.00.00.000 ПЗ

Група АКПм-24-1

Гринишин Олег

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Гринишин Олег Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.187.18 : 681.5.04

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Удосконалення каскадної системи керування автоматизованої

(назва роботи)

водогрійної котельні

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм -24-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

О. І. Гринишин

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я.Чигур

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент, к.т.н

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ - 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

« ____ » _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Гринишину Олегу Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення каскадної системи керування автоматизованої водогрійної котельні

керівник роботи Чигур Людмила Ярославівна, к.т.н., доцент

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від « 10 » 11 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики, аналіз науково-технічної літератури

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1. Опис технологічного процесу як об'єкта керування

4.2. Критичний аналіз підходів до автоматизації технологічного процесу

4.3. Математичне моделювання та ідентифікація об'єкта керування

4.4. Синтез каскадної системи управління котельнею

4.5. Розробка системи управління та інтеграція об'єкта

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Не передбачено завданням

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 22.10.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис технологічного процесу як об'єкта керування	30.10.2025 р.	
2	Критичний аналіз підходів до автоматизації технологічного процесу	10.11.2025 р.	
3	Математичне моделювання та ідентифікація об'єкта керування	20.11.2025 р.	
4	Синтез каскадної системи управління котельнею	30.11.2025 р.	
5	Розробка системи управління та інтеграція об'єкта	08.12.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

Гринишин О.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Чигур Л.Я.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота: 72 ст., 30 рис., 3 табл., 11 джерел

Тема. Удосконалення каскадної системи керування автоматизованої водогрійної котельні.

Об'єкт дослідження є парова водогрійна котельна установка, а саме динаміка теплообмінника та регулюючого клапана подачі пари, для якої необхідно розробити точну математичну модель та ефективну каскадну систему автоматичного керування температурою води на виході.

Мета дослідження полягає у розробці та синтезі ефективної каскадної системи автоматичного регулювання температури води на виході водогрійної котельної установки на основі точної математичної моделі об'єкта, отриманої шляхом параметричної ідентифікації.

Методи дослідження: методи системного аналізу, планування та проведення експерименту, параметричної ідентифікації із застосуванням MATLAB System Identification Toolbox, а також чисельне моделювання (Simulink) та синтез ПІД-регуляторів для каскадної САК.

Результатами магістерської роботи є розробка та синтез високоефективної каскадної системи автоматичного регулювання температури води на виході водогрійної котельної установки. На основі експериментальних даних були отримані точні та валідовані математичні моделі ключових компонентів. Синтезована каскадна структура управління, підтвердила свою ефективність у середовищі моделювання Simulink, продемонструвавши значне покращення динамічних показників порівняно з вихідною системою, включаючи суттєве зниження перерегулювання та скорочення часу встановлення при збереженні високої точності регулювання.

Висновки. Розроблена та синтезована каскадна САК, згідно з результатами чисельного моделювання, забезпечує значне покращення якості перехідних процесів (зниження перерегулювання та скорочення часу встановлення) порівняно з одноконтурним керуванням, що підтверджує ефективність запропонованої архітектури для автоматизації промислових теплових об'єктів.

Ключові слова: математичне моделювання, параметрична ідентифікація, водогрійний котел, теплообмінник, каскадна система керування, ПІД-регулятор, динамічні характеристики, Simulink (MATLAB).

ANNOTATION

Master's work: 72 items, 30 fig., 3 tables, 11 sources.

Subject. Improvement of the cascade control system of an automated hot water boiler room.

The object of the study is a steam hot water boiler plant, namely the dynamics of the heat exchanger and the steam supply control valve, for which it is necessary to develop an accurate mathematical model and an effective cascade system for automatic control of the outlet water temperature.

The purpose of the study is to develop and synthesize an effective cascade system for automatic control of the outlet water temperature of a hot water boiler plant based on an accurate mathematical model of the object obtained by parametric identification.

Research methods: methods of system analysis, planning and conducting experiments, parametric identification using the MATLAB System Identification Toolbox, as well as numerical modeling (Simulink) and synthesis of PID controllers for cascade SAC.

The results of the master's thesis are the development and synthesis of a highly efficient cascade system for automatic control of water temperature at the outlet of a water-heating boiler plant. Based on experimental data, accurate and validated mathematical models of key components were obtained. The synthesized cascade control structure confirmed its effectiveness in the Simulink simulation environment, demonstrating a significant improvement in dynamic performance compared to the original system, including a significant reduction in overshoot and a reduction in settling time while maintaining high control accuracy.

Conclusions. The developed and synthesized cascade AAC, according to the results of numerical simulation, provides a significant improvement in the quality of transient processes (reduction in overshoot and reduction in settling time) compared to single-loop control, which confirms the effectiveness of the proposed architecture for automation of industrial thermal facilities.

Keywords: mathematical modeling, parametric identification, water boiler, heat exchanger, cascade control system, PID controller, dynamic characteristics, Simulink (MATLAB).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	
ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	
1.1. Технологічний процес керування водонагрівальним котлом.....	12
Висновки до розділу 1.....	19
РОЗДІЛ 2	
КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	
2.1. Аналіз літературних джерел	20
2.2. Основи теорії роботи та управління котлами	22
2.3. Традиційні методи управління.....	25
2.4. Удосконалені методи управління.....	26
Висновки до розділу 2.....	28
РОЗДІЛ 3	
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	
3.1. Побудова математичної моделі водогрійного котла та параметрична ідентифікація моделі.....	29
Висновки до розділу 3.....	42
РОЗДІЛ 4	
СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОТЕЛЬНЕЮ	
4.1. Побудова структурної схеми каскадної САК.....	43
4.2. Синтез системи управління у просторі станів.....	48
4.3. Синтез модального регулятора.....	55

Висновки до розділу 4.....	60
----------------------------	----

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ ОБ'ЄКТА

5.1 Розробка системи управління MD PID із системою Honeywell PKS.....	61
---	----

5.2 Інтеграція моделі об'єкта в середовище Honeywell PKS.....	62
---	----

Висновки до розділу 5.....	70
----------------------------	----

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	71
-------------------------------	-----------

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71
--	-----------

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

САК - Система автоматичного керування

САР - Система автоматичного регулювання

ОУ - Об'єкт керування

ПІД-регулятор - Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

ПІ-регулятор - Пропорційно-інтегральний регулятор

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність роботи обумовлена критичною необхідністю підвищення енергоефективності та надійності промислових теплових об'єктів. Оскільки водогрійний котел є інерційним об'єктом із запізненням, традиційні методи керування не забезпечують необхідної точності, що призводить до перевитрат енергії. Робота є актуальною, оскільки вона пропонує науково обґрунтоване інженерне рішення: використання параметричної ідентифікації для отримання точних моделей та синтезу каскадної системи керування, яка ефективно компенсує швидкі збурення, гарантуючи стабільне, швидке та економічне регулювання температури води.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вибір теми є повністю обґрунтованим з точки зору її практичної значущості та наукової новизни. По-перше, водогрійні установки є критичними елементами інфраструктури, і їхня ефективність безпосередньо впливає на енергоспоживання та економічні витрати, що робить задачу точного регулювання температури життєво важливою. По-друге, об'єкт керування, тобто теплообмінник, є складною інерційною системою із запізненням, яка вимагає впровадження просунутих стратегій, як-от каскадна система керування, для ефективного придушення збурень. По-третє, якісний синтез такої системи можливий лише за наявності високоточної математичної моделі, отриманої шляхом параметричної ідентифікації на основі реальних експериментальних даних, а не спрощених аналітичних припущень. Таким чином, тема дослідження поєднує вирішення актуальної інженерної проблеми (підвищення ефективності котельні) із застосуванням передових методів автоматичного керування та моделювання.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає у розробці та синтезі ефективної каскадної системи автоматичного регулювання температури води на виході водогрійної котельної установки на основі точної математичної моделі об'єкта, отриманої шляхом параметричної ідентифікації.

Для досягнення цієї мети були визначені наступні завдання: по-перше, провести системний аналіз динамічних властивостей водогрійної котельної установки, щоб визначити керуючі та керовані параметри. По-друге, спланувати та провести експериментальні дослідження для збору даних, необхідних для ідентифікації.

По-третє, виконати параметричну ідентифікацію динаміки теплообмінника та регулюючого клапана із застосуванням програмного забезпечення MATLAB/System Identification Toolbox та отримати валідовані передатні функції. По-четверте, обґрунтувати вибір каскадної архітектури системи автоматичного керування (САК) та виконати синтез і розрахунок параметрів ПД-регуляторів для внутрішнього та зовнішнього контурів.

Нарешті, реалізувати модель синтезованої каскадної САК у середовищі Simulink, провести чисельне моделювання та оцінити якість перехідних процесів, порівнюючи їх з вихідною системою, що дозволить підтвердити ефективність розробленої системи керування.

Об'єктом дослідження є парова водогрійна котельна установка, що розглядається як складна динамічна система, яка включає теплообмінник (нагрівач) з високою інерційністю та регулюючий клапан подачі пари (виконавчий механізм), де головною метою є моделювання їхньої спільної динаміки для забезпечення стабільного керування температурою води на виході.

Предметом дослідження є процеси автоматичного керування температурою води на виході водогрійної котельної установки, що охоплюють розробку та аналіз математичних моделей динаміки теплообмінника і регулюючого клапана, отриманих шляхом параметричної ідентифікації, а також структуру, параметри та ефективність синтезованої каскадної системи автоматичного керування (САК) у контексті покращення динамічних характеристик, таких як перерегулювання та час встановлення.

Новизна отриманих результатів дослідження полягає насамперед у розробці комплексного методологічного підходу, який поєднує точну ідентифікацію реального об'єкта керування з синтезом сучасної системи автоматизації. Вперше для даної котельної установки була виконана параметрична ідентифікація на основі реальних даних, що дозволило отримати високоточну передатну функцію другого порядку для теплообмінника, яка значно точніше описує його інерційність та динаміку, ніж спрощені моделі, що традиційно використовуються. На основі цих точних моделей було науково обґрунтовано та реалізовано каскадну структуру САК зі спеціально синтезованими параметрами ПД-регуляторів, що є адаптованою до характеристик об'єкта. Чисельним моделюванням підтверджено, що застосування синтезованої каскадної САК дозволяє суттєво покращити якість регулювання температури, зокрема, досягнути значного зниження перерегулювання та скорочення часу встановлення порівняно з одноконтурними рішеннями.

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

Обраний напрямок дослідження має офіційну наукову підтримку, оскільки ця робота інтегрована в тематичний план науково-дослідних робіт Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Дослідження повністю відповідає ключовим пріоритетам кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Крім того, актуальність і практична цінність роботи додатково підтверджується тим, що вона є логічним продовженням та подальшим розвитком результатів, отриманих у рамках виконання державної бюджетної наукової теми.

Практичні значення дослідження полягає у забезпеченні прямого економічного та технічного ефекту для експлуатації водогрійних котельних установок. По-перше, розроблена та синтезована каскадна система автоматичного керування (САК) забезпечує високоточне і швидке регулювання, що дозволяє суттєво підвищити енергоефективність та досягти прямої економії палива завдяки мінімізації перерегулювання та усуненню неоптимальних режимів роботи. По-друге, досягнення швидкої та точної компенсації збурень гарантує стабільність та надійність теплопостачання, підвищуючи його якість для кінцевого споживача. По-третє, отримані точні математичні моделі теплообмінника і регулюючого клапана, а також розроблена методична та програмна база (моделі Simulink та налаштування ПД-регуляторів) можуть бути негайно використані інженерно-технічним персоналом для швидкої модернізації та оптимізації існуючих систем автоматизації на аналогічних об'єктах, що є готовим інженерним рішенням.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота має традиційну структуру та містить: вступ, 5 основних розділів, загальні висновки, список використаних джерел (включає 11 найменувань). Основний текст роботи займає 72 сторінок, які ілюстровані 30 рисунками та містять 3 таблиці.

РОЗДІЛ 1

ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1. Технологічний процес керування водонагрівальним котлом

В основі аналізованої установки лежить паровий водонагрівач. Компактний, промислового виконання агрегат, зібраний на заводській рамі та повністю готовий до підключення. Це рішення є самодостатньою системою для ефективного виробництва гарячої води, що інтегрує всі необхідні компоненти на єдиній платформі, що значно спрощує монтаж і введення в експлуатацію. Промислове виконання гарантує високу надійність та довговічність обладнання в умовах інтенсивної експлуатації, а також відповідність суворим стандартам безпеки, що висуваються до подібних систем.

Ключовою особливістю даної установки, рисунок 1.1, є те, що вона використовує гарячу пару, що надходить як побічний продукт з іншої установки або технологічного процесу, наприклад, від турбін або когенераційних систем.

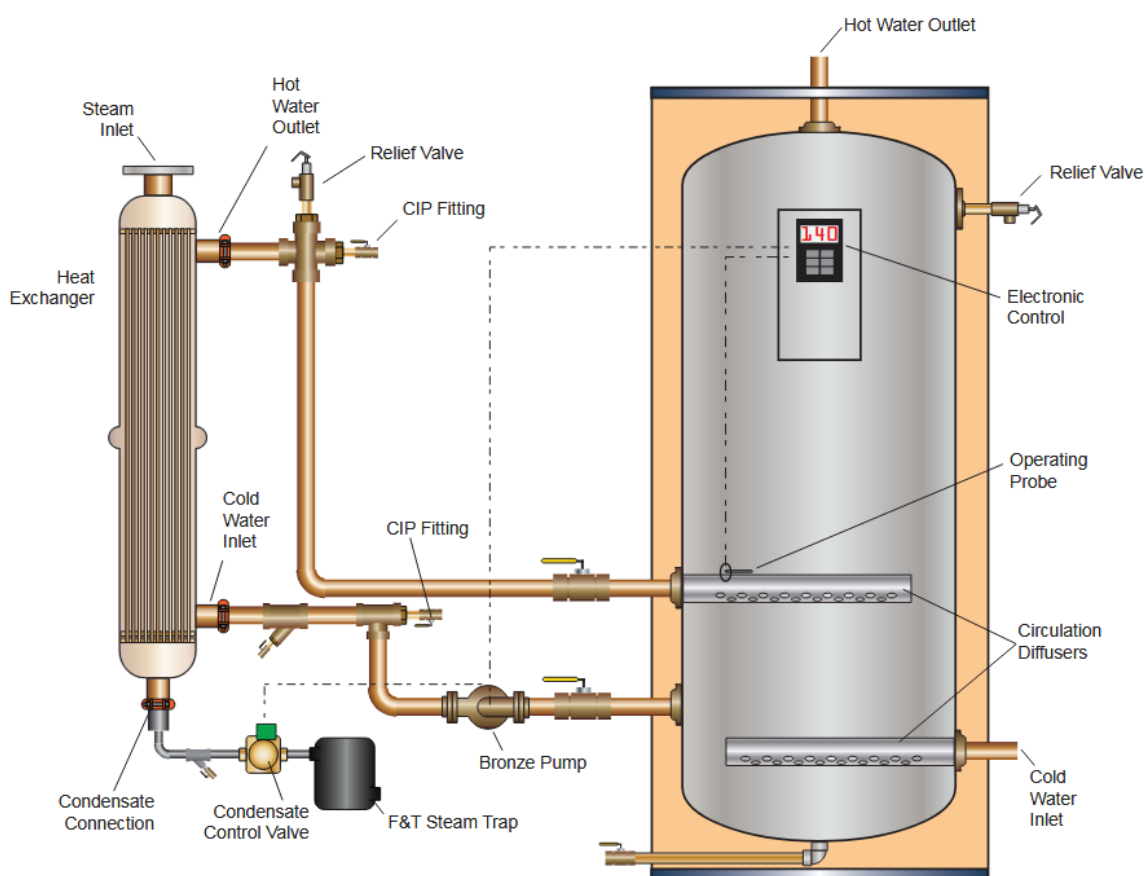


Рис. 1.1. Схема пристрою та підключення водонагрівача на основі парового теплообмінника

Такий підхід дозволяє значно підвищити загальну енергоефективність підприємства, утилізуючи тепло, яке інакше було б втрачено. Цей принцип є основою для створення інтегрованих енергетичних циклів, що скорочують споживання первинних енергоресурсів та знижують експлуатаційні витрати.



Рис. 1.2. Загальний вид водонагрівальної установки

Основою установки є кожухотрубний теплообмінник із мідно-бронзовими трубами, виконаний за схемою протитечії. Пара, що подається в один контур теплообмінника, передає тепло воді, що протікає по іншому контуру в протилежному напрямку, забезпечуючи ефективність передачі тепла, точність контролю температури та швидкий відгук системи (рис.1.3).

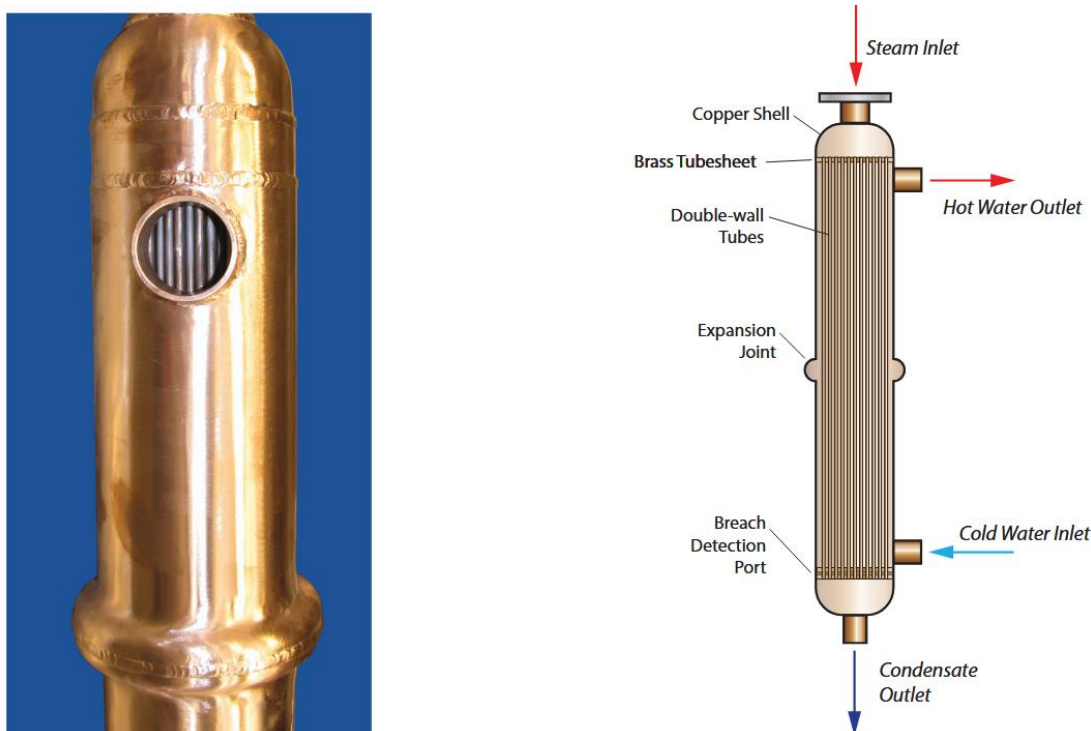


Рис. 1.3. Зовнішній вигляд та структурна схема елемента теплообмінника

Важливою особливістю конструкції є використання мідно-бронзових труб у теплообміннику, що забезпечує високу теплопровідність та корозійну стійкість, необхідні для тривалої та ефективної роботи в умовах постійного нагріву та контакту з водою. Застосування протиточної схеми значно збільшує коефіцієнт теплопередачі, дозволяючи досягати максимально можливого температурного тиску по всій довжині теплообмінника. Це, у свою чергу, сприяє високій енергетичній ефективності установки та мінімізації втрат тепла. Крім того, дана конструкція забезпечує швидке досягнення необхідної температури води завдяки інтенсивній передачі тепла від пари до води.

Установка повністю укомплектована – включаючи циркуляційний насос, керовані клапани, конденсатовідведення та систему електричних захистів, вбудованих на промисловій рамі. Технологічний цикл починається з підживлювальної води, що надходить із накопичувального бойлера.

Як тільки температура опускається нижче заданої точки, спрацьовує система управління: вмикається циркуляційний насос, відкривається клапан парової лінії, і пара надходить у теплообмінник, миттєво передаючи тепло воді. Нагріта вода повертається у нижній бак через дифузори, забезпечуючи гомогенність температури. Охолоджена пара конденсується і виводиться через конденсатовідведення, що сприяє підтримці термодинамічного циклу та раціональному використанню ресурсів.

На рисунку 1.4 наведено структурну схему водонагрівальної установки, що ілюструє взаємозв'язок основних компонентів і потоків робочого середовища. Дана схема демонструє шлях пари від вхідної лінії (Steam In), що проходить через Y-подібний фільтр (Y-Strainer) і клапан тиску, що редукує (Pressure Reducing Valve), який забезпечує подачу пари під контрольованим тиском в теплообмінник. Конденсат, що утворюється після теплообміну, відводиться в конденсатозбірник (Condensate Receiver) для подальшої утилізації або повернення в систему.

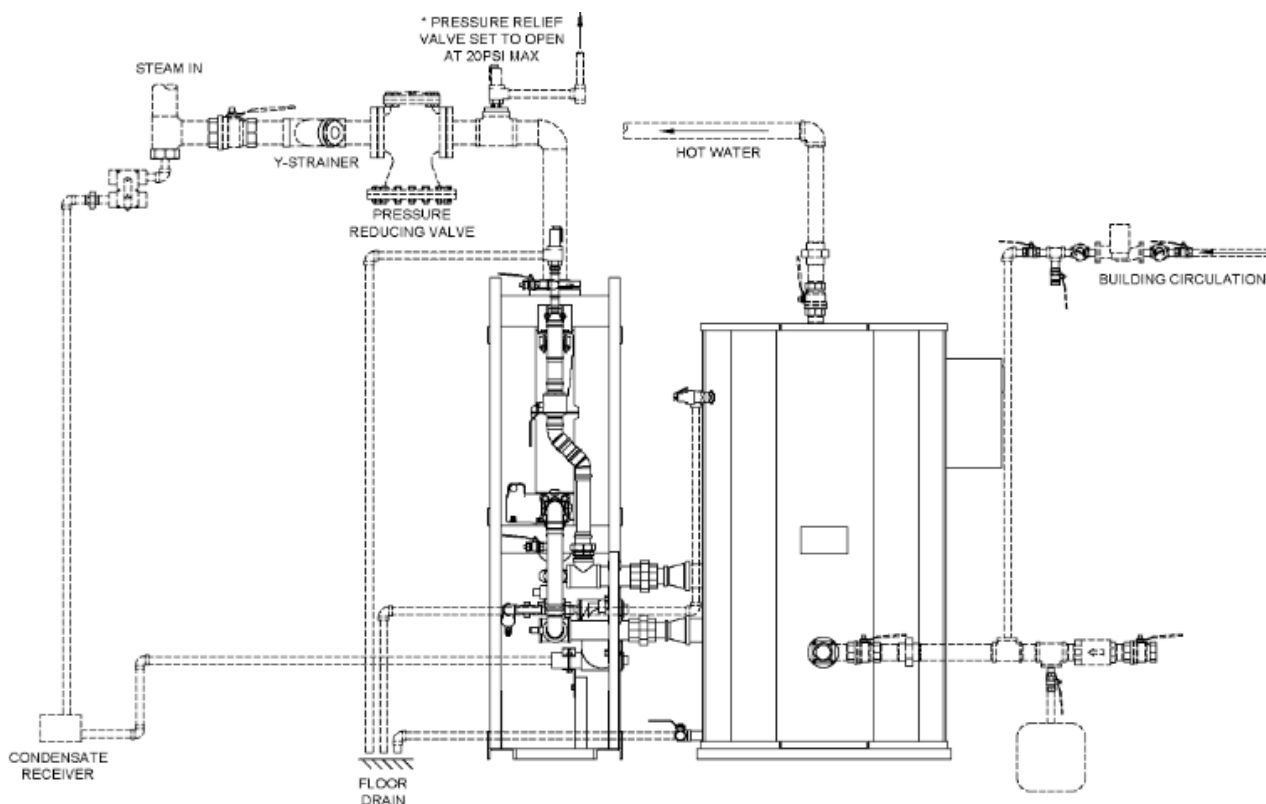


Рис. 1.4. Структурна схема водонагрівальної установки

З іншого боку схеми показаний контур води: холодна вода надходить у накопичувальний бак, де відбувається її нагрівання.

Нагріта вода потім подається до контуру гарячого водопостачання (Hot Water) і до системи циркуляції будівлі (Building Circulation), забезпечуючи подачу гарячої води споживачам. На схемі позначені елементи безпеки, такі як запобіжний клапан тиску (Pressure Relief Valve), а також дренажні лінії (Floor Drain), необхідні для обслуговування та спорожнення системи. Така наочна схема дозволяє детально проаналізувати технологічний процес та принципи функціонування водонагрівальної установки загалом.

Особливу увагу приділено динаміці процесу: подача пари і циркуляція води – параметри, що швидко змінюються, тоді як нагрівання води пов'язане з інерцією. Така різниця в часі реакцій потребує продуманої автоматизації та точного налаштування системи регулювання. Вбудовані датчики температури та витрати/тиску забезпечують надійний вимір контрольованих змінних, у тому числі для каскадного керування, де внутрішній контур стабілізує подачу пари, а зовнішній – забезпечує стабілізацію вихідної температури води. Система безпеки включає захист від перегріву, обмежувачі тиску та температурні аварійні клапани.

Для наочного уявлення взаємодії основних компонентів системи управління з урахуванням парового водонагрівача розглянемо функціональну схему автоматизації. Вона відображає структуру системи, включаючи контури регулювання, вимірювальні елементи, виконавчі механізми та зв'язки між ними. Схема дозволяє зрозуміти, яким чином здійснюється збір інформації про параметри процесу, її обробка системою управління та формування керуючих впливів, спрямованих на підтримку стабільної температури води, що нагрівається. Особлива увага у цій системі приділяється організації каскадного регулювання, у якому внутрішній контур забезпечує контроль подачі пари, а зовнішній – а стабілізацію вихідної температури води. Така дворівнева структура управління значно підвищує точність та динамічні характеристики системи, мінімізуючи вплив збурень. Ефективність цієї схеми підтверджується її широким застосуванням у промислових системах, де потрібний високий рівень автоматизації та надійності. Саме детальний аналіз цієї схеми дозволяє не тільки зрозуміти логіку роботи системи, але й виявити потенційні точки для оптимізації та покращення показників регулювання. Вона є основою для подальшого синтезу алгоритмів управління та вибору оптимальних налаштувань регуляторів. На рисунку 1.5 представлено функціональну схему автоматизації водонагрівального котла.

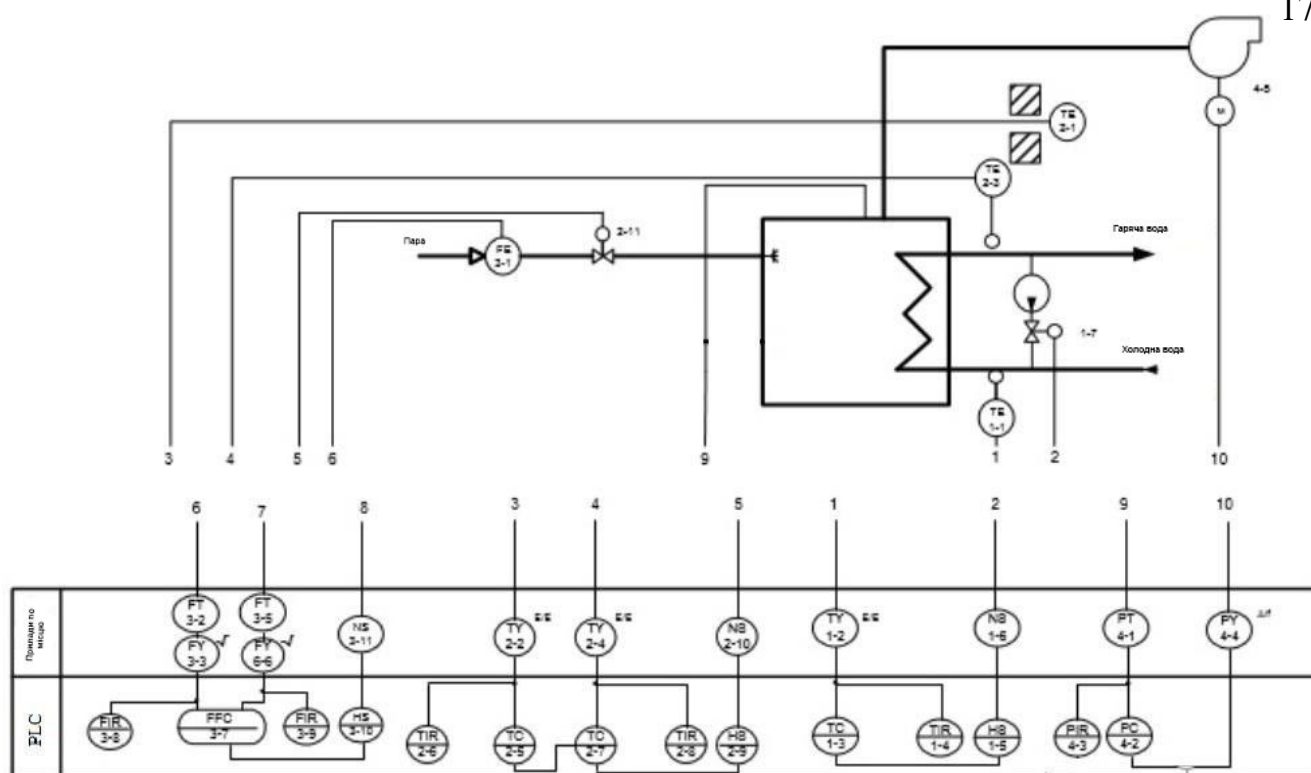


Рис. 1.5. Функціональна схема автоматизації водонагрівальної установки

Функціональна схема автоматизації, що детально ілюструє принцип роботи системи управління водонагрівального котла. Центральне місце у ній займає контролер, виконує роль керуючого центру установки. Він обробляє вхідну інформацію від різних датчиків, встановлених у ключових точках системи: на вході та виході теплообмінника, накопичувальному баку, а також у паровій лінії. Температурні датчики фіксують поточні значення температури води у різних зонах, що необхідно реалізації точного термічного контролю. Датчики тиску або витрати пари надають дані, що дозволяють оцінити стан теплового джерела та своєчасно реагувати на його коливання. Всі ці вимірювання надходять у контролер, де порівнюються із заданими значеннями, і на основі виявленої помилки формуються керуючі сигнали. Контролер передає управляючі команди виконавчим пристроям. Одним із ключових виконавчих елементів є регулюючий клапан на паропроводі, що забезпечує дозовану подачу пари в теплообмінник в залежності від поточного теплового навантаження. Його точна та швидка робота критична для підтримки стабільності температури нагріву.

Не менш важливим є циркуляційний насос, що відповідає за безперервний рух води по системі, що гарантує рівномірність нагріву та відсутність температурних зон.

Також до системи можуть бути включені допоміжні пристрої: електромагнітні клапани, пристрої змішування, сигналізатори граничних значень тощо. Усі вони формують єдиний контур управління, спрямований на забезпечення ефективності і надійності роботи котельної установки.

Особливу роль у схемі відіграє реалізація каскадного принципу регулювання, який дозволяє справлятися з різницею у тимчасових характеристиках між швидким зміною тиску пари та відносно повільним відгуком температури води. Внутрішній контур керування, що працює за сигналом від датчика тиску пари, відповідає за швидке реагування системи на зміни джерела тепла. Він забезпечує стійкість теплового потоку, мінімізуючи вплив коливань процес теплообміну. Зовнішній контур керування орієнтований на вимірювання температури води на виході із системи та коригує уставку внутрішнього контуру, тим самим забезпечуючи узгоджену роботу обох гілок управління. Завдяки такому підходу досягається висока точність регулювання, особливо в умовах навантаження, що динамічно змінюється, характерної для промислових теплових мереж. Каскадна структура дозволяє мінімізувати перерегулювання, підвищує швидкодію системи та покращує загальну якість регулювання температури.

Додатково функціональна схема відображає елементи системи безпеки, що грають важливу роль в експлуатації водогрійного обладнання. До них відносяться запобіжні клапани, обмежувачі тиску та температури, датчики аварійних станів, а також пристрої відключення подачі пари у разі перевищення критичного заданих параметрів. Всі ці пристрої пов'язані з контролером, який безперервно моніторить стан системи та у разі виявлення аварійної ситуації здатний миттєво ініціювати захисні дії: відключити подачу пари, зупинити насос, активувати аварійну сигналізацію або заблокувати роботу обладнання. Така архітектура підвищує надійність системи загалом та мінімізує ризик виходу обладнання з ладу або виникнення аварійних ситуацій.

Таким чином, представлена функціональна схема демонструє взаємозв'язок усіх компонентів автоматизованої системи керування паровим водогрійним казаном. Вона забезпечує не тільки високу точність регулювання температури води, а й надійність, гнучкість адаптації до навантажень, а також безпеку експлуатації.

Висновки до розділу 1

У цьому розділі було надано детальний опис парової водонагрівальної установки промислового виконання, яка використовує побічну гарячу пару для підвищення енергоефективності.

Розглянуто її конструктивні особливості, включаючи використання кожухотрубного теплообмінника з мідно-бронзовими трубами та протиточною схемою для максимальної тепловіддачі.

Пояснено технологічний цикл нагріву води, що включає роботу циркуляційного насоса та відведення конденсату. Ключовою частиною є опис системи автоматизації з функціональною схемою, де центральне місце займає контролер, який керує процесом через регулюючий клапан пари.

Особливу увагу приділено застосуванню каскадного принципу регулювання (внутрішній контур для пари, зовнішній для температури води) для забезпечення високої точності та динаміки системи, а також наголошено на важливості вбудованих систем безпеки.

Використання каскадної структури, продуманої архітектури контурів управління та комплексу захисних пристроїв дозволяє ефективно реалізувати технологічний процес нагрівання води з використанням пари у промислових умовах.

РОЗДІЛ 2

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

2.1. Аналіз літературних джерел

Каскадні системи управління являють собою одну з класичних схем багаторівневого регулювання, що широко застосовується в промислових процесах для підвищення якості регулювання та придушення збурень. Основна ідея каскадного управління полягає у розбиття системи на зовнішній (повільний) і внутрішній (швидкий) контури: внутрішній контур працює на більш «швидкому» процесі і служить для компенсації збурень до їх передачі у зовнішній контур, тоді як зовнішній контур забезпечує більш точне та повільне стеження за завданням [1]. Як зазначається у багатьох джерелах, каскадна структура дозволяє ефективно придушувати обурення та покращувати швидкодію регулювання. За словами Бошковича та ін., мета такого поділу – аби обурення у внутрішньому контурі придушувалися вторинним регулятором до того, як вони досягнуть зовнішнього контуру [2].

Відповідно, каскадні системи широко використовуються там, де потрібна висока точність, стійкість до перешкод та роздільний контроль за параметрами з різними динамічними характеристиками. Історично розвиток каскадного регулювання був із галуззю парових котлів і суднобудуванням. При підвищенні тиску в котлах зменшення об'єму парових барабанів призвело до більш складних стратегій управління. У сучасних котельних установках нерідко використовується так звана триланкова схема управління, маюнок 1.1: регулятори рівня води в барабані, витрати поживної води та витрати пари працюють спільно, причому пріоритетом залишається підтримання рівня води у вузькому допустимому діапазоні. Триланкова система (3-element control) є окремим випадком каскадної структури з додатковими каналами і є у літературі як приклад ефективного управління паровими котлами [4]. Схожа концепція – каскадного керування – може застосовуватися й у системах теплопостачання з гарячою водою, коли внутрішній контур підтримує швидкість відгуку системи (наприклад, швидкий регулятор витрати палива чи палива/повітря), а зовнішній – температуру теплоносія. Сучасні дослідження пропонують різні методи проектування каскадних систем управління та налаштування регуляторів.

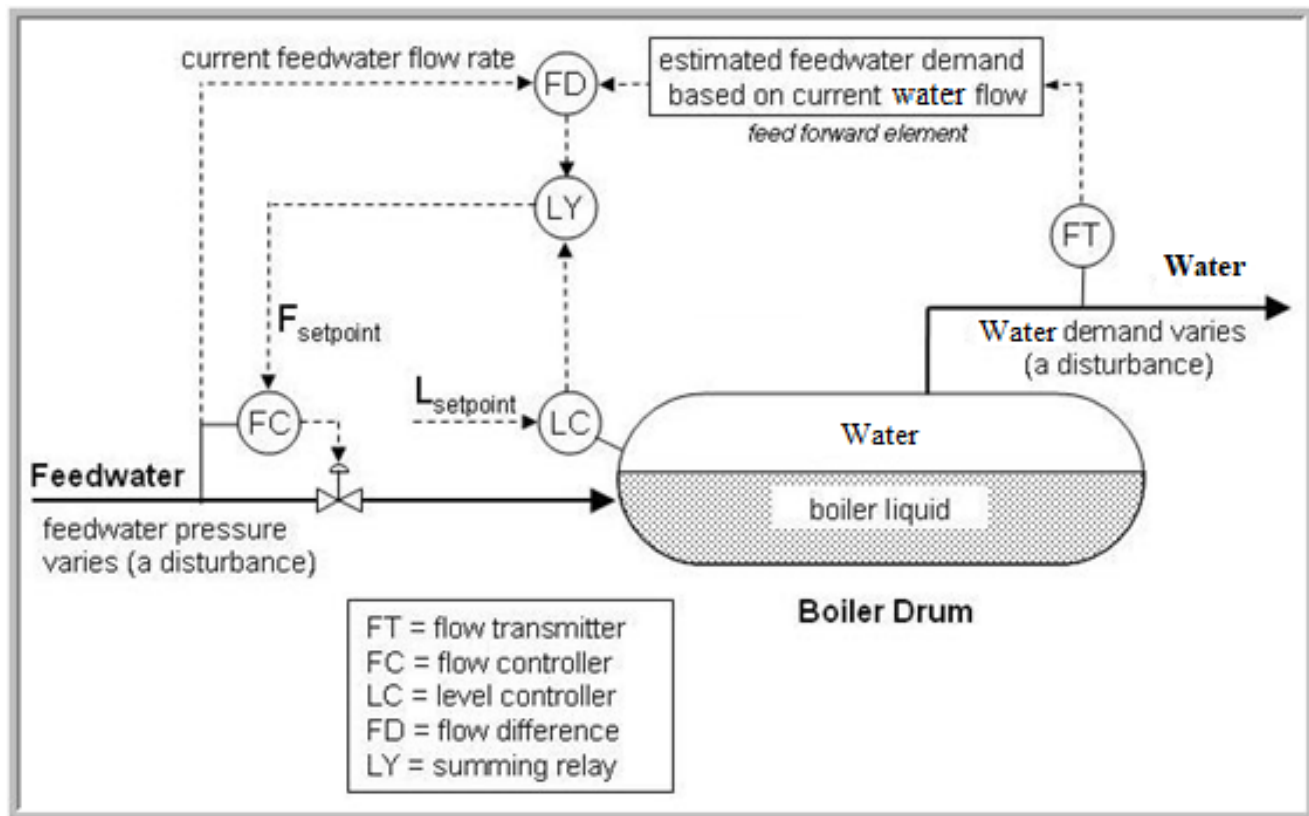


Рис. 2.1. Застосування триланкової системи керування бойлера

Однак класичні методи налаштування ПД (наприклад, Зіглера-Ніколса) часом не враховують взаємодію контурів і складність динаміки котла [9].

Наприклад, розробляються алгоритми автоматичного налаштування параметрів PID-регуляторів у зовнішньому та внутрішньому контурах.

У роботі Бошковича із співавторами описано аналітичний метод проектування PI/PID-регуляторів для двоконтурних каскадних процесів, що враховує обмеження щодо стійкості та продуктивності [6].

Вони показують, що завдяки такому налаштуванню досягається ефективно придушення збурень, що виявляється у зменшенні інтегральної абсолютної помилки (IAE) при перехідних процесах. Інші дослідження присвячені використанню методів адаптивного керування, оптимальних регуляторів та моделей передиктивного керування в контексті багаторівневих систем. У літературі наголошується, що каскадний контроль залишається одним із найефективніших «просунутих» елементів індустріального управління, незважаючи на прогрес у галузі MPC та інтелектуальних систем [7].

З іншого боку, для котельних систем розглядаються різні алгоритми управління. Традиційно в котельнях встановлюються ПД-регулятори, оскільки вони забезпечують просту реалізацію та достатню надійність.

Тому в сучасних дослідженнях все частіше застосовуються методи оптимального та адаптивного керування. Наприклад, LQR-регулятори та полюсне розміщення у просторі станів дозволяють гнучкіше керувати динамікою системи, мінімізуючи заданий критерій якості. Методи прогнозуючого управління (MPC) та релейно-нейромережеві підходи також вивчалися для опалювальних систем, проте їх докладний опис виходить за рамки даної роботи. В цілому можна відзначити, що поєднання каскадної структури та сучасних методів налаштування дає кращі результати порівняно з одиночними ПД-системами [11].

2.2. Основи теорії роботи та управління котлами

Водогрійна котельня – це термодинамічна система, яка призначена для передачі тепла від джерела до води. Основним завданням управління є підтримка температури води на виході на бажаному заданому рівні незалежно від збурень. До основних порушень відносяться зміни в джерелі тепла (наприклад, коливання тиску пари), коливання температури холодної води, що надходить, і зміни потреби в гарячій воді (навантаження). Ефективна система управління повинна вміти швидко та ефективно протистояти цим обуренням, щоб підтримувати стабільну роботу та мінімізувати втрати енергії. Особливо актуальним це завдання стає за умов змінного навантаження, коли споживання гарячої води може різко змінюватися, вимагаючи оперативного коригування подачі теплоносія. Тому розробка робастної системи управління, здатної адаптуватися до умов, що змінюються, є ключовим аспектом забезпечення надійності та економічності роботи водогрійної котельні. Це досягається за рахунок впровадження адаптивних алгоритмів управління та оптимізаційних стратегій, які дозволяють не лише парувати поточні збурення, а й передбачати зміни навантаження, забезпечуючи проактивне регулювання та подальше зниження енергоспоживання.

На рисунку 2.2 представлена схема промислової установки для нагрівання гарячої води. Коли виникає потреба у гарячій воді, холодна підживлювальна вода надходить у накопичувальний бак, знижуючи його загальну температуру. Система керування реагує на це, активуючи насос та відкриваючи клапан конденсату, що циркулює воду через теплообмінник. У теплообміннику пара передає своє приховане тепло воді, що циркулює.



Рис. 2.2. Промислове встановлення для нагрівання гарячої води

Потім нагріта вода повертається у накопичувальний бак через дифузорні трубки, які допомагають підтримувати теплову градієнтність. Цей процес забезпечує ефективну подачу гарячої води доти, доки температура в баку не відновиться до заданого значення. Процес нагрівання води в котлі протікає в умовах, схильних до безлічі експлуатаційних збурень, включаючи коливання температури та тиску живильної води, зміни витрати теплоносія, а також нестабільність подачі енергоресурсу. Ці фактори значно впливають на стійкість та точність регулювання температури, що потребує надійної та адаптивної системи автоматичного керування. Саме тому вибір стратегії регулювання та її точне налаштування відіграють вирішальну роль у забезпеченні ефективної та безпечної роботи водогрійного котла.

У цій роботі розглядається водогрійний котел, який використовує як джерело теплової енергії насичену або перегріту пару. Такий тип котельної установки широко застосовується в промислових об'єктах, де вже є централізоване паропостачання, або де пар виробляється в інших технологічних циклах і може бути ефективно використаний для вторинного нагрівання води. На рисунку 2.3, наведено схему роботи даної установки.

Перевага використання пари полягає в її високій теплопередавальній здатності та можливості швидкого регулювання температури теплоносія. Пара надходить до теплообмінника, де передає свою енергію воді, підвищуючи її температуру до заданого рівня.

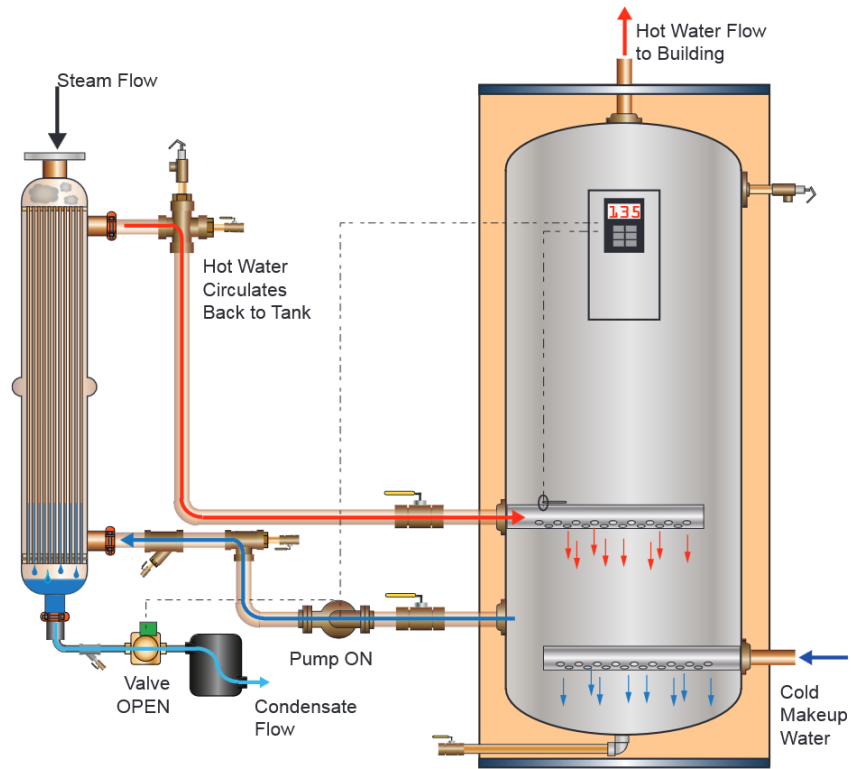


Рис.2.3. Промислова водонагрівальна установка

Однак процес нагрівання з використанням пари схильний до безлічі динамічних факторів, таких як коливання тиску і температури пари, зміни витрати води та інерційність теплопередачі. Це створює певні складнощі для системи автоматичного керування, оскільки для підтримки стабільних параметрів на виході потрібне точне налаштування регуляторів, здатних швидко реагувати на зміни умов роботи.

Коли виникає потреба у гарячій воді, холодна підживлювальна вода надходить у накопичувальний бак, знижуючи його температуру. Система керування активує насос і відкриває клапан конденсату, циркулюючи воду через теплообмінник, де пара передає тепло воді. Потім нагріта вода повертається в накопичувальний бак через дифузійні трубки для підтримки процесу градації, забезпечуючи ефективну подачу гарячої води, поки температура в баку не відновиться [10].

Основою системи є теплообмінник, де відбувається передача теплової енергії. Динаміка цього процесу, як правило, повільна та регулюється принципами теплопередачі та тепловою масою води та обладнання. Ефективність теплопередачі залежить від швидкості потоку пари, швидкості потоку води та фізичних властивостей теплообмінника.

Парорегулюючий клапан є останнім елементом керування (приводом), яким керує система керування. Він регулює потік пари у теплообмінник.

Динаміка клапана зазвичай набагато швидше, ніж теплова динаміка теплообмінника. Він має власні характеристики, такі як час відгуку, характеристики потоку (наприклад, лінійні або пропорційні) і потенційні нелінійності, такі як опір або гістерезис.

Для реалізації ефективної системи керування використовуються датчики, що вимірюють ключові параметри технологічного процесу. Найбільше значення має вимірювання температури води на виході з котла, оскільки саме вона є основною керованою величиною, що визначає якість функціонування системи. Також важливу роль відіграє вимірювання витрати або тиску пари, що використовується як джерело тепла і контролюється у внутрішньому контурі каскадної системи. Надійність, точність та швидкодія цих датчиків мають критичне значення, оскільки від їхньої коректної роботи залежить своєчасність реакції системи управління на зміни умов, а отже – стабільність та безпека функціонування водогрійного котла.

Проблема полягає в тому, що первинне обурення (тиск пари) є швидкодіючим, а процес, яким ми хочемо керувати (температура), – повільно діючим. Це невідповідність у динаміці – саме та проблема, яку має вирішити каскадне управління.

2.3. Традиційні методи управління

Однією з найбільш широко застосовуваних стратегій автоматичного регулювання у промислових системах є ПІД-регулятор. В одноконтурній схемі керування котлом вимірювання вихідної температури води здійснюється за допомогою температурного датчика, після чого отримане значення порівнюється із заданим (уставкою). На основі різниці між поточним значенням та завданням регулятор формує керуючу дію, яка подається на виконавчий механізм найчастіше паровий регулюючий клапан. Робота ПІД-регулятора ґрунтується на трьох складових: пропорційна частина забезпечує реакцію на величину поточної помилки, інтегральна – усуває залишкове відхилення в режимі, а диференціальна – дозволяє передбачити напрямок і швидкість зміни помилки, сприяючи запобіжному впливу. Такий підхід дозволяє досягти прийняттого рівня точності, стійкості та швидкодії системи за відносно простої реалізації.

У простій конфігурації котел використовує базовий контур управління зі зворотним зв'язком для підтримки температури води на виході шляхом маніпулювання потоком пари використовуючи паровий клапан.

Однак при роботі зі швидкими збуреннями, такими як раптові зміни витрати пари, які можуть суттєво вплинути на стабільність температури, виникають проблеми.

Ці обурення відбуваються набагато швидше, ніж теплова динаміка системи, що робить один ПІД-регулятор недостатнім для підтримки точного керування, рисунку 2.4 наведено схему управління з одним регулятором.

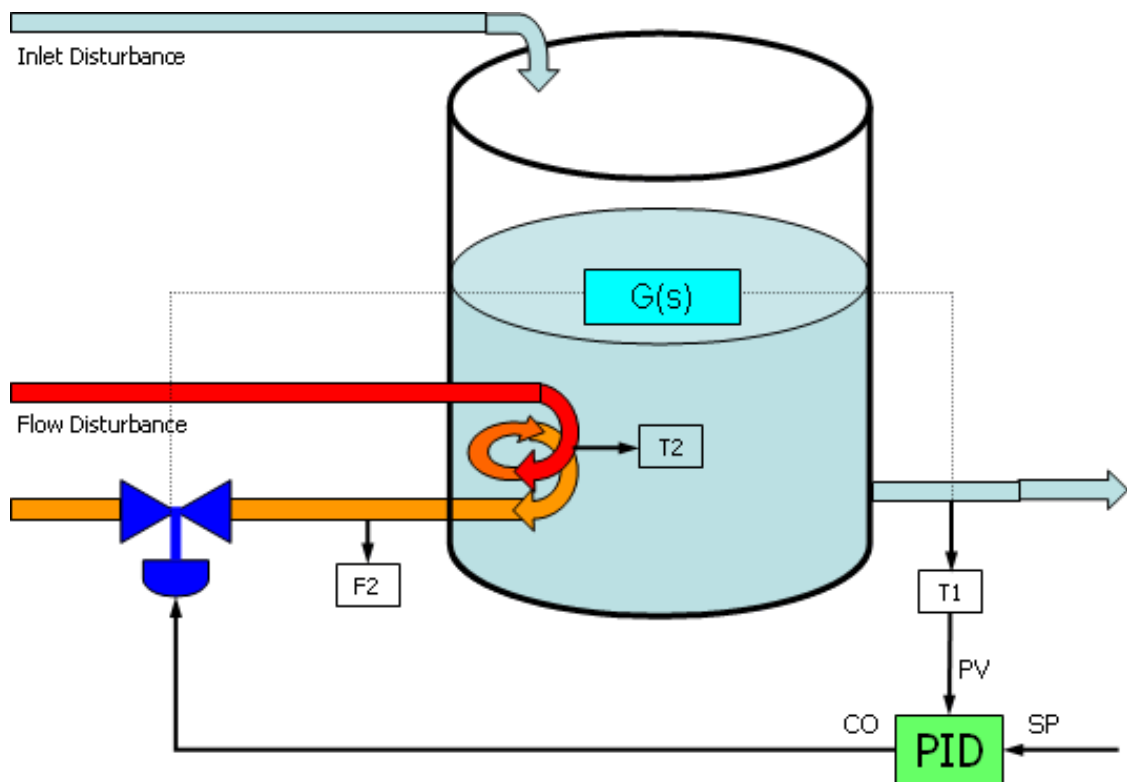


Рис.2.4. Функціональна схема керування з одним ПІД-регулятором

2.4. Удосконалені методи управління

Каскадне управління – це класична вдосконалена структура управління, розроблена для подолання обмежень одноконтурних систем шляхом використання двох або більше регуляторів у вкладеному вигляді. Основна ідея полягає у використанні вторинного (внутрішнього) контролера для управління швидкодіючим обуренням до того, як воно зможе суттєво вплинути на первинну змінну процесу.

Як показано на рисунку 2.5, система включає два контури управління.

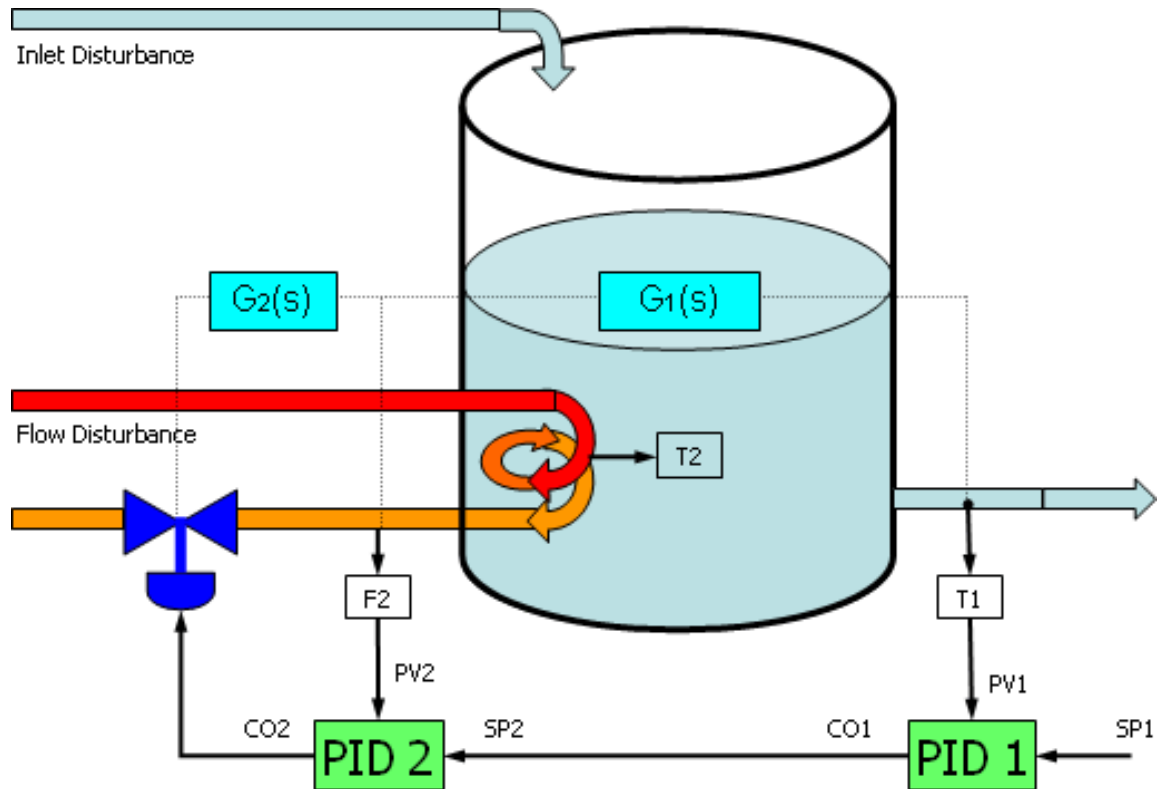


Рис. 2.5. Функціональна схема управління, що включає первинний (зовнішній) контур та вторинний (внутрішній) контур

Первинний контур, також відомий як зовнішній контур, відіграє найважливішу роль регулювання температури води на виході (T_1). Його основна функція полягає у підтримці необхідної теплової рівноваги в системі котла шляхом визначення оптимальної витрати пари. Цей контур працює у більш повільному масштабі часу, оскільки він керує загальною стабільністю температури, яка за своєю суттю є поступовим процесом. Зосередившись на підтримці теплової рівноваги, він забезпечує відповідність температури води, що подається заданому значенню в системі навіть за наявності зовнішніх збурень.

Вторинний контур, або внутрішній контур, призначений для швидкого реагування та точності. Він безпосередньо керує положенням парового клапана для регулювання витрати пари, що надходить теплообмінник. Його основне завдання – швидко реагувати на різкі коливання, спричинені порушеннями у системі постачання, наприклад, змінами тиску пари.

Стабілізуючи ці швидкі коливання, внутрішній контур дозволяє зовнішньому контуру зосередитися на більш повільному та масштабному завданні регулювання температури, забезпечуючи ефективність та оперативність роботи котельної системи. Цей взаємодоповнюючий зв'язок між внутрішнім і зовнішнім контурами є суттю каскадного регулювання.

Завдяки розподілу завдань управління між цими двома контурами, каскадна система управління досягає максимальної продуктивності.

Вторинний контур швидко компенсує обурення, тоді як первинний контур забезпечує відповідність температури на виході заданому значенню (SP). Такий ієрархічний підхід підвищує стійкість та мінімізує взаємодію між швидкою та повільною динамікою процесу.

Використання каскадного управління вносить певні складнощі, наприклад, необхідність незалежного налаштування двох ПІД-регуляторів. Однак це компенсується значним покращенням відбраковування збурень та загальної стійкості системи. Крім того, система може бути розширена за рахунок включення додаткових рівнів каскадного управління для складніших додатків, хоча практичні реалізації рідко перевищують три рівні через зменшення віддачі та збільшення складності налаштування.

Висновки до розділу 2

Цей розділ присвячений аналізу сучасних підходів до управління технологічними процесами в теплотехнічних системах, зокрема водогрійними котельнями. Розглядаються теоретичні основи роботи котлів, методи автоматичного регулювання, а також існуючі технічні рішення у галузі промислової автоматизації. Особлива увага приділяється порівнянню традиційних та сучасних методів управління, включаючи одноконтурне ПІД-регулювання та складніші каскадні та оптимальні алгоритми.

Аналізується наукова література, нормативні документи та інженерні практики, що дозволяють обґрунтувати вибір найефективнішої структури системи управління. Проведена аналітична робота формує основу розробки автоматизованої системи, що забезпечує високу стабільність, надійність і адаптивність за умов змінних технологічних навантажень і зовнішніх збурень.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

3.1. Побудова математичної моделі водогрійного котла та параметрична ідентифікація моделі

Для розробки ефективного регулятора на основі моделі потрібна точна математична модель установки. У цьому дослідженні ми використовуємо підхід параметричної ідентифікації, який використовує експериментальні вхідні дані для отримання моделі.

Цей метод часто є більш практичним та точним, оскільки він за своєю суттю відбиває справжню динаміку побудованої системи. Процес включає розробку експерименту, збір даних, попередню обробку даних, вибір структури моделі, оцінку параметрів моделі і валідацію остаточної моделі.

Параметрична ідентифікація одна із найважливіших етапів побудови адекватних математичних моделей складних систем, як-от водонагрівальні установки. Як показано на малюнку, суть цього процесу полягає у визначенні оптимального вектора параметрів P для математичної моделі

$$Y = F(X, U, P),$$

де X - вектор вхідних координат збурень), U - вектор вихідних параметрів, а Y - вектор вихідних координат. Мета параметричної ідентифікації у тому, щоб розроблена модель максимально точно (найбільшою мірою адекватно) описувала поведінка реального об'єкта. Формально завдання параметричної ідентифікації зводиться до мінімізації розбіжності між вихідними даними, отриманими від математичної моделі, і експериментальними даними, вимірними на реальному об'єкті.

Це виражається цільовою функцією, поданою нижче

$$\| Y_{mod}(P) - Y_{exp} \rightarrow \min_{P \in P} \| \quad (3.1)$$

Тут різниця, наскільки сильно модель помиляється порівняно з реальністю, позначає деяку норму (наприклад, суму квадратів помилок), а мінімізація здійснюється за вектором параметрів у допустимому діапазоні.

Вибір оптимального вектора дозволяє моделі відтворювати поведінку об'єкта з найменшою можливою помилкою. Для вирішення цієї оптимізаційної задачі, яка часто є нелінійною, використовуються різні методи мінімізації функцій багатьох змінних. До них відносяться градієнтні методи, методи якнайшвидшого спуску, Монте-Карло, а також сучасніші алгоритми нелінійного програмування та глобальної оптимізації. Вибір конкретного методу залежить від складності моделі, кількості параметрів, що ідентифікуються, і доступних обчислювальних ресурсів. Для моделювання об'єкта управління (ОУ) з регулюванням тиску пари, що подається, в теплообміннику була проаналізована динаміка нагріву води і наростання тиску потоку пари. Основна увага приділяється тому, як тепло, що надходить від пари, передається воді через теплообмінну поверхню, і як зміни вхідних параметрів – зокрема тиску пари та витрати води – впливають на вихідну температуру. Такий підхід дозволяє описати термодинамічну поведінку системи у вигляді математичної моделі, придатної для подальшого аналізу та синтезу системи керування.

При побудові моделі передбачається, що теплообмінник є зосереджену теплову ємність, де теплопередача від пари до води може бути описана рівнянням теплового балансу. Вода циркулює через теплообмінник з певною масою і теплоємністю, накопичуючи тепло, що підводиться, і передаючи його на виході у вигляді підвищення температури. Пара, що надходить до змішувача або трубного контуру, передає своє приховане тепло конденсації, а його тиск і температура впливають на інтенсивність теплопередачі. Таким чином, система характеризується як інерційний об'єкт із запізненням, в якому зміна подачі пари не призводить до миттєвої зміни температури води на виході, а проявляється з певною затримкою та постійною тимчасовою.

Для параметричної ідентифікації моделі були використані дані, отримані в результаті моделювання або експериментального спостереження перехідних процесів реакції температури води на зміну ступінчастого тиску пари. На основі цих даних апроксимація об'єкта була виконана за допомогою лінійної динамічної моделі другого порядку або послідовного з'єднання аперіодичних ланок. Надалі така модель використовуватиметься для розрахунку параметрів регуляторів, оцінки стійкості системи та проведення комп'ютерного моделювання серед MATLAB/Simulink.

У ході експерименту котел доводився до стану і працював у режимі постійної подачі пари в теплообмінник при незмінному витраті води.

Для виключення впливу зовнішніх факторів на результати вимірювань були замкнуті внутрішні контури регулювання рівня води та температури в самому котлі: керуючі алгоритми безперервно підтримували задані значення рівня, тиску та вихідної температури води, діючи на підживлювальний насос, регулюючий клапан підживлення та контур рециркуляції.

Одночасно контур регулювання температури теплообмінника залишався відкритим, що дозволяло фіксувати динаміку зміни вихідної температури у відповідь на задані крокові зміни тиску пари. По кожному експериментальному прогону реєструвалися часові показники процесу – залежність температури і тиску у внутрішньому контурі від часу, що дозволило зібрати повний набір даних для подальшого аналізу. Ці часові лави були використані в процедурах параметричної ідентифікації.

Ідентифікація системи є ключовим етапом у розробці автоматизованого регулятора, оскільки дозволяє отримати точний емпіричний опис динамічної поведінки котла під реальними експлуатаційними умовами. Без коректно визначених параметрів моделі будь-які розрахунки з налаштування ПД-регулятора носитимуть лише наближений характер і часто призводять до недостатньо точного або надто консервативного управління. Зокрема, знання справжніх значень постійних часу, коефіцієнтів передачі та порядку динаміки системи дає можливість прогнозувати реакцію котла на керуючі впливи та оцінювати стійкість майбутньої замкнутої системи заздалегідь, ще до її впровадження на обладнанні.

Процедура ідентифікації включає декілька етапів. Спочатку на обладнанні виконуються спеціально сплановані експерименти – ступінчасті зміни подачі пари або витрати води – за яких фіксується тимчасова зміна ключових вихідних величин (температури та тиску). Потім отримані перехідні характеристики піддаються математичній обробці: за допомогою методів найменших квадратів або алгоритмів частотного аналізу визначається апріорна структура моделі (наприклад, аперіодична ланка першого порядку із запізненням або складніша модель другого порядку). Після цього чисельні параметри моделі уточнюються шляхом мінімізації помилки між експериментальними даними та відгуком системи, що моделюється.

У результаті створюється адекватна математична модель, що описує динаміку котла з достатньою точністю інженерних розрахунків.

Така модель дозволяє не тільки підібрати оптимальні коефіцієнти ПД-регулятора, пропорційну, інтегральну та диференціальну складові, але й оцінити запас стійкості, мінімізувати перерегулювання та забезпечити необхідну швидкість перехідного процесу.

Надалі точність моделі служить основою для проведення комп'ютерного моделювання та тестування роботи регулятора у віртуальному середовищі, що значно знижує ризики під час виведення системи в експлуатацію та економить час на її налагодження.

Спираючись на отриману в ході ідентифікації математичну модель, наступним кроком є детальний аналіз ключових компонентів котельної установки, оскільки їх динамічні властивості багато в чому визначають поведінку всієї системи управління. По-перше, це сам водонагрівач - кожухотрубний теплообмінник, який відповідає за передачу теплоти конденсації пари циркулюючій воді. Його динаміка, як правило, описується аперіодичним ланкою першого або другого порядку з досить великою постійною часу i , часто, із запізненням, викликаним накопиченням теплової енергії в масі металу труб і стінок. Саме через цю інерційність теплообмінника зміна подачі пари не відразу відбивається на вихідній температурі води, що вимагає застосування систем з розділеними тимчасовими шкалами управління. При аналітичному дослідженні теплообмінника ми оцінюємо його передатну функцію, визначаємо час запізнення та величину коефіцієнта передачі пар-вода, а також враховуємо нелінійні залежності тепловіддачі від швидкості потоку та різниці температур.

Другим найважливішим елементом є клапан керування потоком пари, який безпосередньо здійснює дозування робочого середовища у теплообміннику. Динаміка цього клапана відрізняється суттєво меншою інерційністю, час відкриття/закриття та перехідні процеси протікають набагато швидше, ніж у самому теплообміннику, проте на його характеристику впливають такі фактори, як залежність пропускну здатності від положення штока, наявність гістерези та зони нечутливості, а також можливий вплив вібрацій та коливань. При побудові моделі клапана ми виділяємо його передатну функцію, визначаємо коефіцієнт передачі керуючий вплив-витрата пари та оцінюємо динамічну точність (час установки та перерегулювання).

Сукупне дослідження цих двох підсистем повільного теплообмінника та швидкодіючого клапана дозволяє закласти основу для синтезу каскадного регулятора, в якому внутрішній контур компенсує швидкі збурення потоку пари, а зовнішній контур відповідає за повільне та точне стеження температури гарячої води.

Збір та обробка експериментальних даних для ідентифікації моделі у MATLAB System Identification Toolbox починалися з підготовки тимчасових рядів вхідних та вихідних сигналів у форматі, зручному для роботи в середовищі MATLAB. Це включало імпорт даних з різних джерел, таких як датчики температури, витрати пари та води, з подальшою синхронізацією, фільтрацією шумів та усуненням можливих перепусток або аномалій.

Далі, ці очищені дані перетворювалися на спеціалізовані об'єкти даних (наприклад, `iddata` або `idfrd`), що дозволяло використовувати потужні інструменти Toolbox, малюнок 3.2, для візуалізації, попереднього аналізу та вибору відповідних моделей.

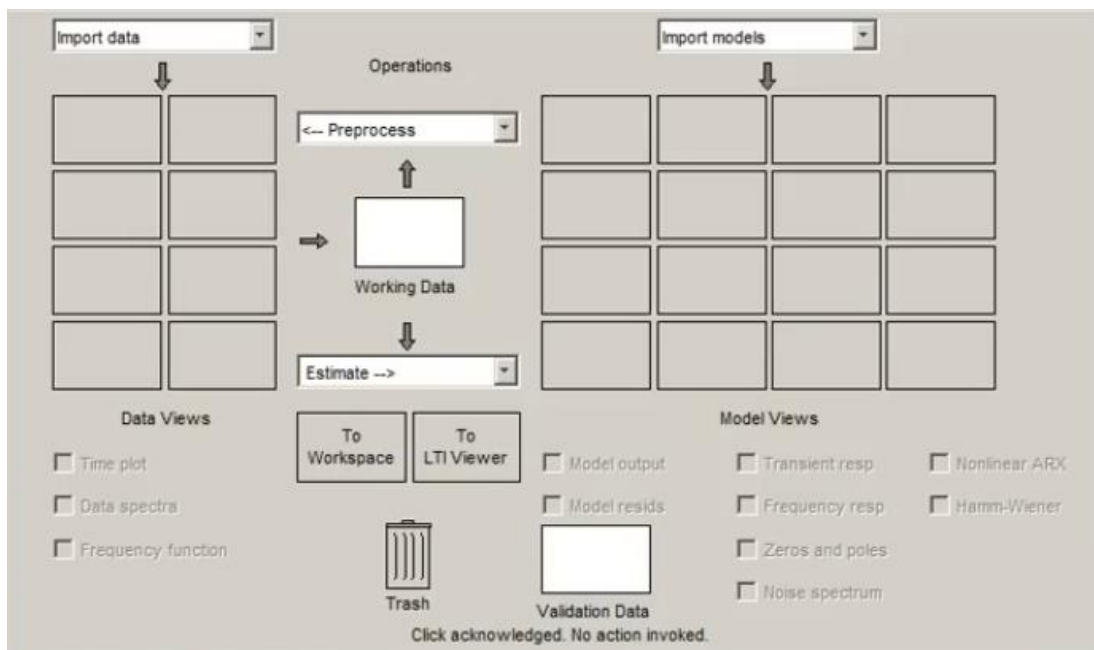


Рис. 3.2. Вікно MATLAB System Identification Toolbox

Робота в MATLAB System Identification Toolbox починається з імпорту експериментальних рядів витрати пари та температури води у вигляді об'єктів даних, які готові до аналізу. При відкритті розділу System Identification створюється новий проект, малюнок 3.3, де користувач пропонує завантажити файли з вимірюваннями.

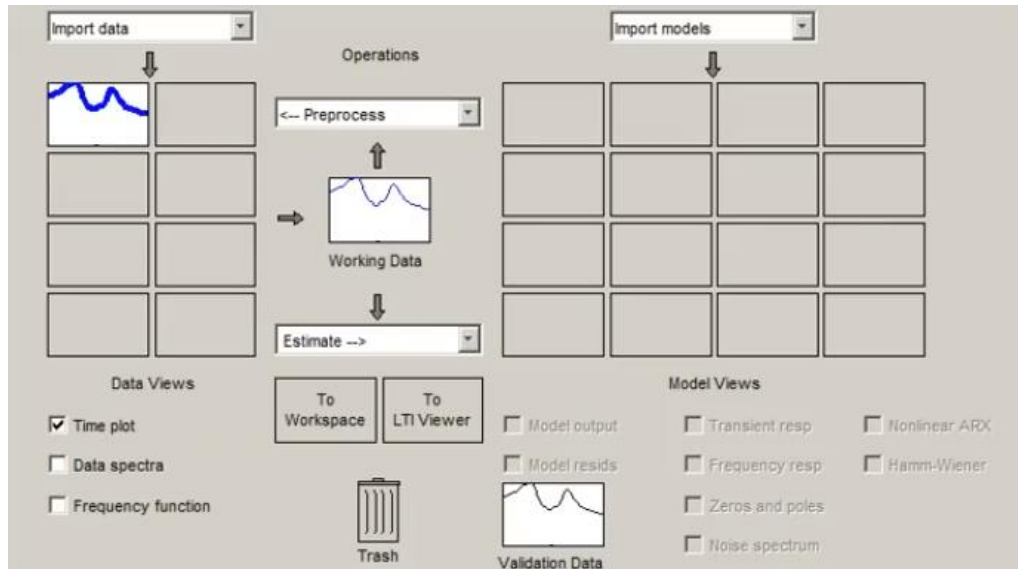


Рис. 3.3. Вікно імпортованих даних

Відразу після імпорту сигналів вони візуалізуються на графіках, рисунок 3.4, що дозволяє визначити наявність аномальних викидів та довгострокових трендів.

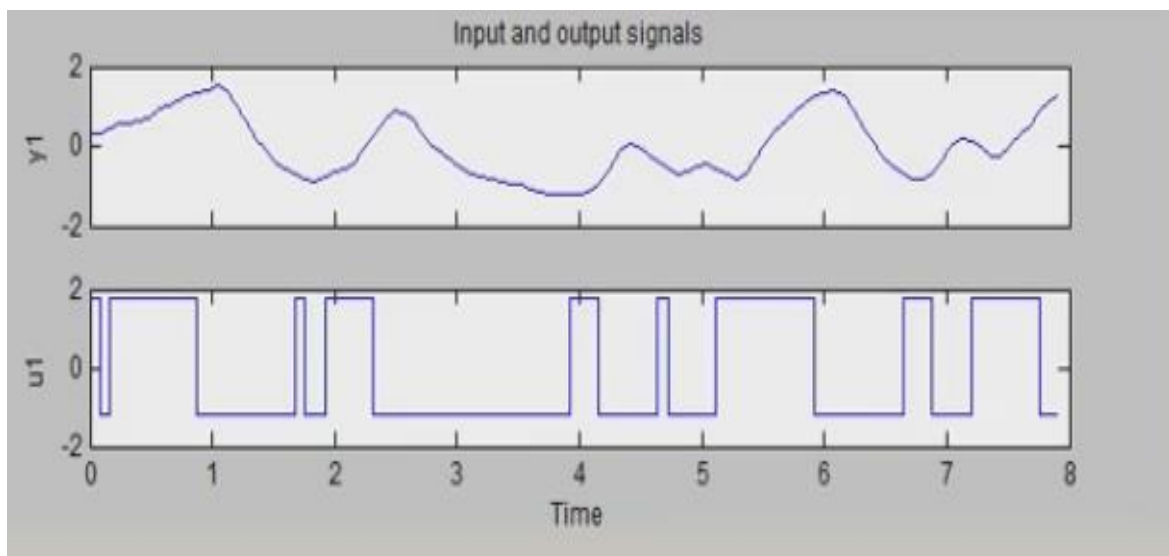


Рис. 3.4. Вікно попереднього перегляду вихідних даних

Для підвищення якості майбутньої моделі застосовуються вбудовані команди очищення: автоматично видаляються викиди, що не відповідають характерним перехідним процесам, а повільні «фонові» зміни видаляються за допомогою вбудованого фільтра високих частот. Така попередня обробка гарантує, що інструмент ідентифікації працюватиме лише з корисними динамічними компонентами, що відображають реакцію котла на керуючі дії.

При налаштуванні параметрів ідентифікації в System Identification Toolbox одним із ключових кроків є вибір порядків поліномів чисельника та знаменника передавальної функції, яка апроксимуватиме динаміку досліджуваного об'єкта.

Цей процес починається з переходу у вкладку "Model Structure" у графічному інтерфейсі Toolbox, де потім вибирається тип моделі "Transfer Function".

У діалоговому вікні, що з'явилося, рисунок 3.5, користувач має вказати бажані порядки: наприклад, порядок чисельника задає число коефіцієнтів при ступенях в поліномі чисельника, а порядок знаменника аналогічно визначає число коефіцієнтів для полінома в знаменнику.

The image shows a dialog box titled "Model name: tf1" with a pencil icon. It contains the following fields and options:

- Number of poles:** 2
- Number of zeros:** 1
- Time Domain:** Radio buttons for "Continuous-time" (selected) and "Discrete-time (Ts = 0.08)".
- I/O Delay:** A collapsed section.
- Estimation Options:**
 - Fit frequency range:** Minimum: 0, Maximum: 39.2699
 - Display progress:**
 - Estimate covariance:**
 - Initial condition:** auto
 - Initialization method:** iv
- Buttons:** Estimate, Close, Help

Рис. 3.5. Вікно вибору параметрів системи

Дуже важливо пам'ятати, що занадто низький порядок може виявитися нездатним адекватно відобразити всю складність динаміки системи, у той час як надмірно високий, навпаки, призведе до небажаного перенавчання, коли модель починає відтворювати шум даних, втрачаючи при цьому свою здатність до узагальнення нових, невідомих даних.

Крім цього, в даному діалоговому вікні передбачена можливість задати параметр «Input Delay», який дозволяє апріорно врахувати відоме запізнення між моментом подачі впливу, що управляє, і початком фактичного відгуку системи. Це допомагає більш точно ідентифікувати внутрішню динаміку об'єкта, крім розгляду затримки, не пов'язані безпосередньо з його фізичними процесами. У процесі ідентифікації математичної моделі об'єкта, що досліджується, були застосовані різні комбінації параметрів передавальної функції, такі як порядки поліномів чисельника і знаменника, а також значення транспортного запізнення. Для кожної з цих комбінацій System Identification Toolbox оцінював відповідні коефіцієнти, прагнучи якнайкраще апроксимувати динаміку системи. В результаті цієї роботи, малюнок 3.6, було отримано кілька кандидатів на роль передавальної функції, кожен з яких був модель з певною структурою та набором ідентифікованих параметрів.

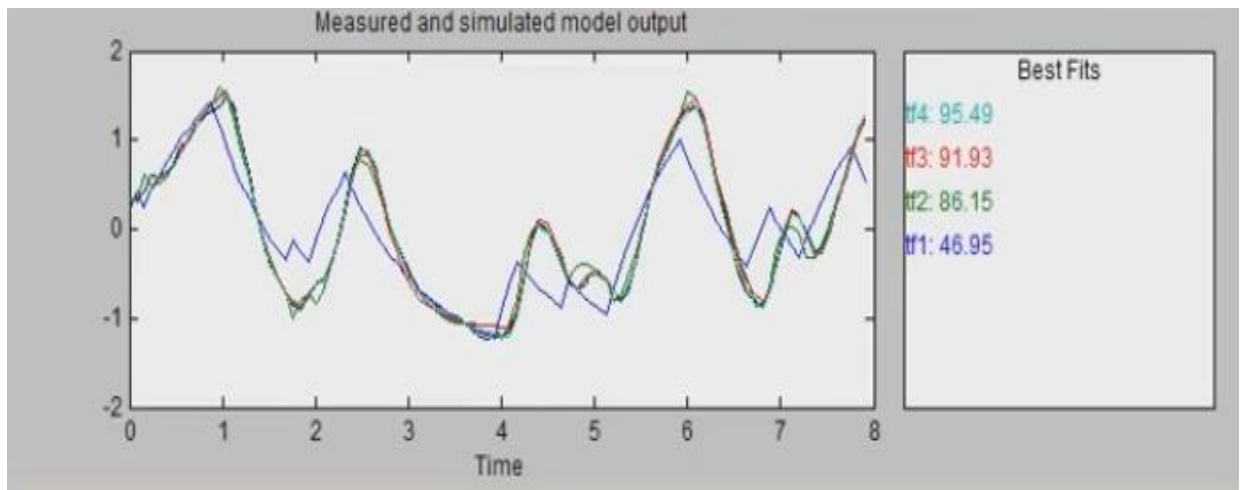


Рис. 3.6. Результати параметричної ідентифікації

Динаміка теплообмінника в системі водогрійного котла визначається взаємозв'язком між кількістю теплової енергії, що подається через пару (вхідний сигнал), і температурою води, що нагрівається на виході (вихідний сигнал). Оскільки процес теплопередачі між парою і водою в теплообміннику характеризується вираженою інерційністю, наявністю теплової ємності та можливим запізненням, його поведінка не може бути адекватно описана простими статичними співвідношеннями. Для точного відтворення динаміки був проведений експеримент, в рамках якого на систему вплинули ступінчастою зміною витрати пари при фіксованому витраті води. В результаті були отримані дані перехідного процесу, що відображають, як система реагує на стрибкоподібну зміну теплового потоку.

У ході підбору структури моделі було встановлено, що найкраща відповідність між експериментальним та модельованим відгуком дає передатна функція другого порядку. Така модель дозволяє враховувати як інерційні властивості теплообмінника, так і його здатність накопичувати та передавати тепло з певною затримкою та швидкістю. В результаті процесу ідентифікації було отримано наступну передатну функцію

$$G_{Heater}(s) = \frac{0.2101s + 0.01235}{s^2 + 0.06787s + 0.006284} \quad (3.2)$$

Чисельник передавальної функції включає диференціальну складову, що відображає вплив швидкості зміни теплового потоку на динаміку нагрівання. Це вказує на те, що не тільки абсолютне значення пари, що подається, але і темп її зміни впливає на температуру на виході. Другий порядок системи, і два коефіцієнти, що визначають амортизацію та швидкість наростання відгуку. Таке уявлення системи свідчить про її аперіодичну поведінку з помірним уповільненням.

Важливо підкреслити, що дана модель описує виключно теплову динаміку самого теплообмінника і не включає елементи управління, такі як клапан подачі пари. Вона відображає поведінку об'єкта за умови, що подача пари регулюється безпосередньо і без обмеження, тобто в умовах ідеального впливу. Таким чином, модель використовується як основа для побудови первинного (зовнішнього) температурного контуру каскадної системи управління, в якому завдання регулятора полягає у забезпеченні стабільного виходу температури води при дії різних зовнішніх збурень. На наступному етапі ця передатна функція буде використана для синтезу ПД-регулятора зовнішнього контуру, а також для оцінки стійкості та якості перехідних процесів в системі, що імітується.

Ця модель відображає динамічну поведінку системи та є основою для розробки ПД-регулятора. Отримані параметри передавальної функції дозволяють точно налаштувати регулятор, забезпечуючи ефективне регулювання та підтримання необхідних рівнів тиску котла.

Для перевірки моделі, що вийшла, зберемо схему моделювання системи автоматичного регулювання за допомогою MATLAB і промодельємо для отримання перехідних характеристик розімкнутої САР, малюнок 3.7. А також імпортуємо експериментальні дані до Simulink.

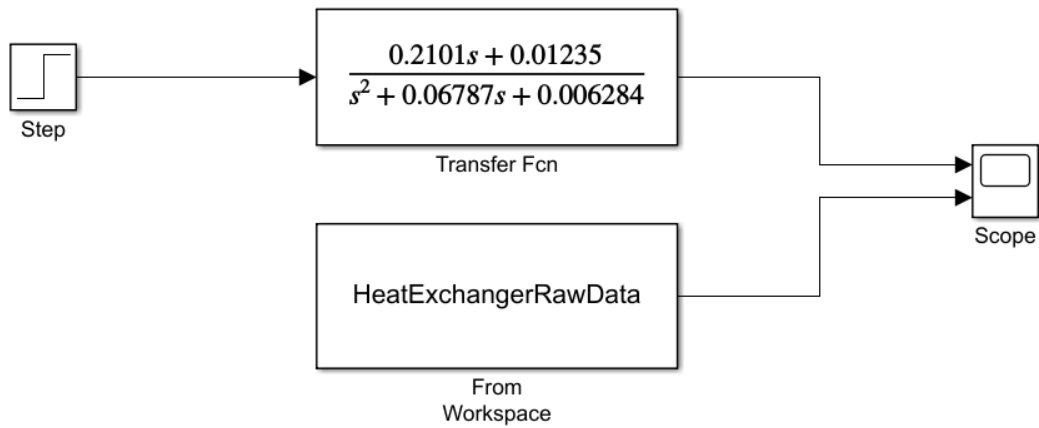


Рис. 3.7. Структурна схема розімкнутої САР нагрівача

На малюнку 3.8 наведено графік порівняння даних з експерименту та результатів моделювання водонагрівача, він ілюструє перехідний процес змодельованого теплообмінника, демонструючи його відповідність експериментальним даним та підтверджуючи обґрунтованість ідентифікованої моделі.

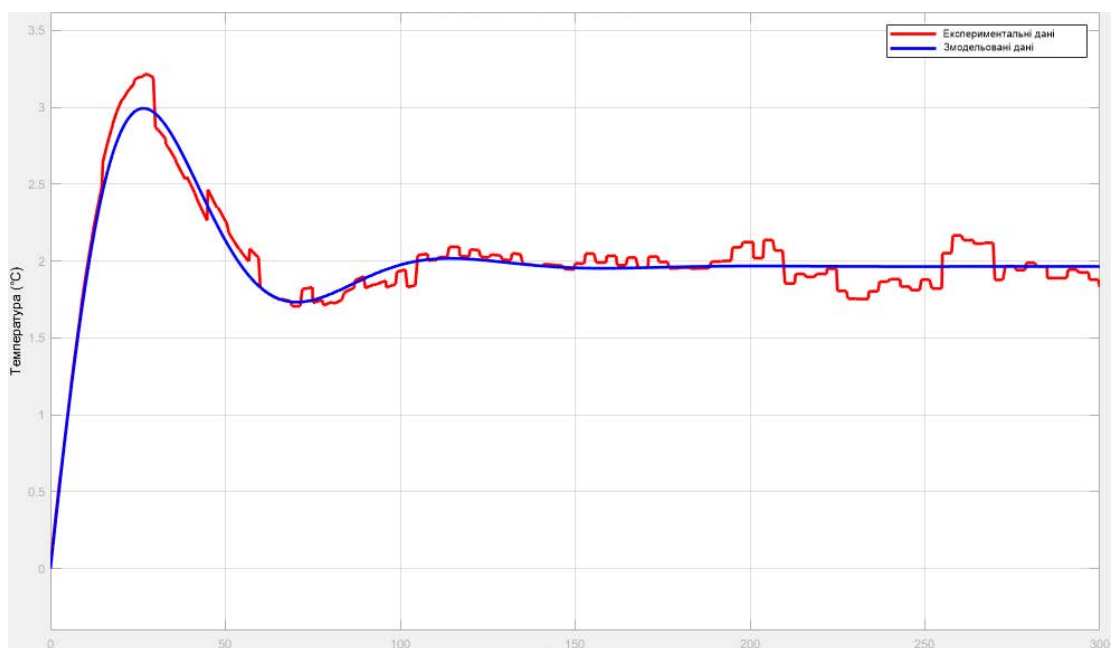


Рис. 3.8. Порівняння експериментальних та змодельованих даних нагрівача

Регулюючий клапан управління потоком пари, що окремо стоїть, є одним з ключових компонентів всієї системи автоматичного управління водогрійним котлом. Його функція полягає в точному дозуванні кількості пари, що надходить у теплообмінник, відповідно до керуючого сигналу від контролера.

Від надійності і точності роботи цього елемента безпосередньо залежить ефективність і стабільність теплопередачі, а значить здатність системи підтримувати задану температуру води на виході при тепловому навантаженні, що змінюється. Для того щоб забезпечити високу точність управління та адекватно вбудувати клапан у загальну математичну модель системи, було проведено окреме дослідження його динамічних та статичних характеристик, спрямоване на виявлення основних факторів, що впливають на його поведінку у реальних умовах експлуатації. Особливу увагу в цьому дослідженні приділяли оцінці динаміки реакції клапана на керуючі дії. Оскільки клапан є механічним пристроєм з певною інерцією, його відгук на зміни сигналу, що управляє, не є миттєвим. Були розглянуті такі особливості, як запізнення сигналу, інерційність рухомих частин, а також вплив нелінійностей, властивих клапанним механізмам, таких як гістерезис (затримка між зміною сигналу і початком руху), мертві зони (зони, в яких малі керуючі впливи не викликають змін витрати). положень). Всі ці характеристики впливають на здатність системи точно регулювати потік пари, особливо при малих змінах уставки або під час роботи в динамічних режимах. Для отримання достовірної моделі клапана були зібрані експериментальні дані, що відображають його поведінку у відповідь на ступінчасті та лінійні зміни сигналу, що управляє. У процесі експерименту фіксувалися значення керуючого впливу (наприклад, напруга керування або позиція штока клапана) і відповідні значення витрати пари. Ці дані були завантажені в MATLAB System Identification Toolbox, де було проведено процедуру параметричної ідентифікації.

$$G_{valve}(s) = \frac{3.152e^{-0.6s}}{2.89s+1} \quad (3.3)$$

Для моделювання поведінки клапана була обрана структура передавальної функції першого порядку із запізненням, що відображає інерційну, але досить швидко динаміку елемента. В результаті обробки даних та оптимізації параметрів була отримана наступна модель. Ця передатна функція визначає реакцію витрати пари на керуючий вплив. Числовач моделі містить коефіцієнт передачі, що показує чутливість клапана до керуючого сигналу, а також ланка запізнення, що вказує на час, необхідний клапану для початку фізичного руху після подачі сигналу. Знаменник відбиває інерційні властивості клапана.

Така структура моделі дозволяє досить точно апроксимувати поведінку клапана в широкому діапазоні робочих умов і врахувати затримку реакції при розробці каскадної системи управління.

Ідентифікована передатна функція, отримана на основі експериментальних даних, враховує не тільки статичні характеристики регулюючого клапана, але і динамічну поведінку, що є критично важливим для точного моделювання системи в цілому. Модель включає як запізнення, пов'язане з фізичним часом спрацьовування виконавчого механізму, так і інерцію, обумовлену його масою і гідравлічними опорами. Таким чином, ця передатна функція служить ключовим елементом для подальшого аналізу та синтезу контурів регулювання, забезпечуючи передбачуваність відгуку клапана на керуючі дії та підвищуючи стабільність усієї системи.

Для візуального представлення роботи клапана було побудовано структурну схему його розімкнутої системи автоматичного регулювання (САР), показану малюнку 3.9. Ця схема ілюструє взаємодію керуючого сигналу з динамікою клапана без участі зворотного зв'язку, тобто відображає чисту поведінку клапана як об'єкта управління. Вона дозволяє ізольовано досліджувати відгук клапана, не включаючи теплообмінник та інші елементи системи.

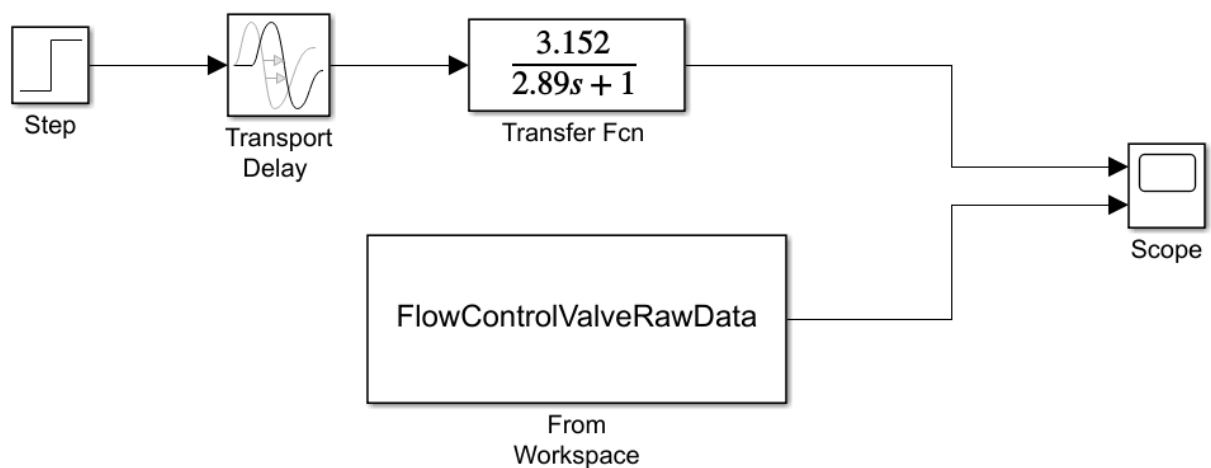


Рис. 3.9. Структурна схема розімкнутої САР клапана

На рис. 3.10 представлено порівняння експериментальних даних, отриманих у ході випробувань, та результатів, отриманих з використанням змодельованої передавальної функції.

Графік демонструє перехідну характеристику клапана: після подачі ступінчастого керуючого сигналу витрата пари починає збільшуватися з певною затримкою і виходить на значення з плавним зростанням, що відповідає інерції і амортизації механічної системи.

Близька відповідність між експериментальною кривою та результатами моделювання підтверджує точність ідентифікованої моделі та її придатність для використання у подальшому проектуванні регулятора. Ця згода особливо важлива, оскільки точне уявлення поведінки клапана забезпечує стійкість замкнутої системи управління і дозволяє уникнути небажаних ефектів, таких як перерегулювання, коливання або запізнення відгуку всієї системи під час роботи в умовах змінного навантаження.

На підставі отриманої перехідної характеристики та високої якості апроксимації модель клапана може бути впевнено використана для синтезу системи автоматичного регулювання. Точність моделювання виконавчого механізму, яким є регулюючий клапан, має вирішальне значення для ефективної роботи всієї каскадної системи керування водонагрівальною установкою. Зокрема, вона дозволяє коректно налаштувати параметри внутрішнього контуру регулювання витрати пари, що, у свою чергу, забезпечить стабільність та швидкодію зовнішнього контуру, який відповідає за підтримку заданої температури води.

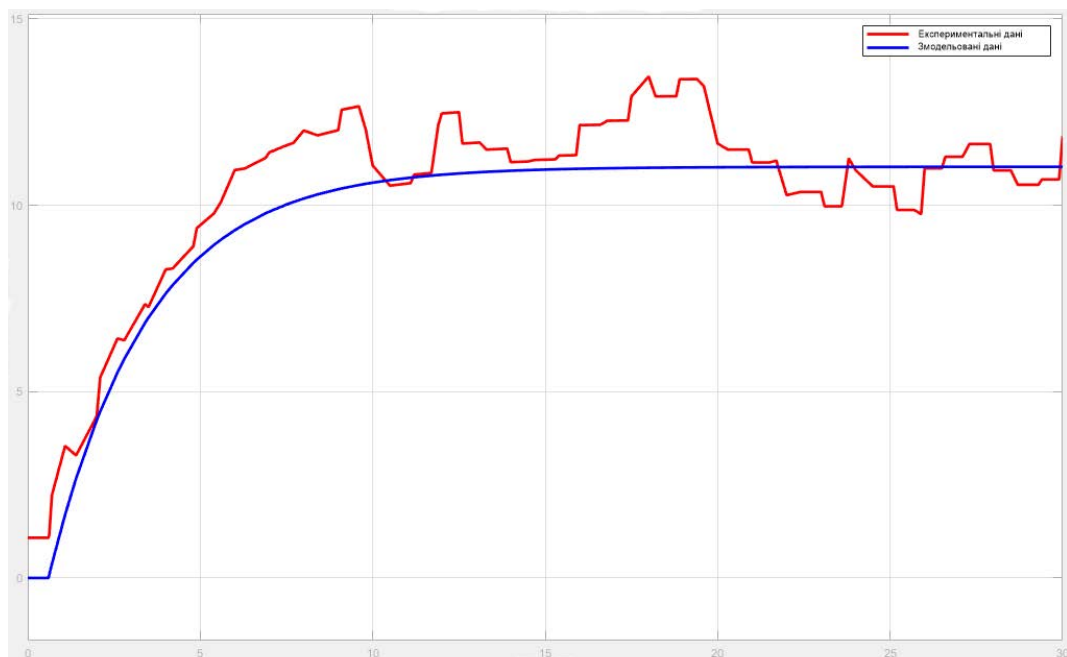


Рис. 3.10. Порівняння експериментальних та змодельованих даних клапана

Таким чином, проведена параметрична ідентифікація клапана з урахуванням його фізичних і динамічних характеристик дозволила створити реалістичну модель, яка буде використовуватися при побудові каскадної системи управління. Модель клапана доповнює раніше ідентифіковану модель теплообмінника, забезпечуючи комплексне уявлення про всю динаміку об'єкта, що необхідно для точного розрахунку налаштувань регуляторів та побудови сталої та ефективної системи автоматизації водогрійної котельної установки.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі було проведено математичне моделювання та ідентифікація ключових динамічних компонентів парової водонагрівальної установки з метою отримання точних передатних функцій, необхідних для синтезу регулятора.

Основний підхід полягав у параметричній ідентифікації, де шляхом мінімізації похибки між експериментальними даними та відгуком моделі визначалися оптимальні параметри. Для цього було проведено експериментальне дослідження, де фіксувалася реакція системи на ступінчасту зміну подачі пари при відкритому контурі регулювання температури.

В результаті ідентифікації в середовищі MATLAB System Identification Toolbox були отримані дві ключові передатні функції: модель теплообмінника (об'єкт керування, що описує динаміку нагріву води) як ланка другого порядку і модель регулюючого клапана (виконавчий механізм) як ланка першого порядку із запізненням.

Отримані моделі були валідовані порівнянням змодельованих та експериментальних перехідних характеристик, що підтвердило їх адекватність та придатність для подальшого синтезу каскадної системи автоматичного регулювання.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ КАСКАДНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОТЕЛЬНЕЮ

4.1. Побудова структурної схеми каскадної САК

Розробка ефективної каскадної системи управління для автоматизованої водогрійної котельні є складним процесом, спрямованим на інтеграцію двох взаємопов'язаних контурів управління: зовнішнього і внутрішнього, кожен з яких виконує спеціалізовані функції для досягнення оптимального регулювання динамічної поведінки системи. Зовнішній контур, позначений у даному уривку як темно-зелений, відповідає за керування повільною динамікою, пов'язаною з підтримкою температури води на виході або тиску в котлі, забезпечуючи загальну теплову рівновагу в системі та компенсуючи довгострокові зміни, такі як коливання попиту на гарячу воду. Внутрішній контур, позначений помаранчевим кольором, функціонує у більш швидкому часовому масштабі, фокусуючись на усуненні швидкодіючих збурень, таких як зміни витрати пари, за допомогою управління положення парового клапана, що дозволяє стабілізувати вхідні параметри зовнішнього контуру і підвищити загальну стійкість системи.

Така структура, представлена на структурній схемі моделювання каскадної системи автоматичного регулювання (САР) на малюнку 4.1, наголошує на важливості поділу завдань управління для досягнення високої точності та стабільності в умовах складної динаміки котельної установки. Основна мета цього розділу полягає у поглибленому аналізі та синтезі каскадної системи управління, з урахуванням теоретичних засад, методології проектування, результатів моделювання та потенційних напрямків для подальших досліджень.

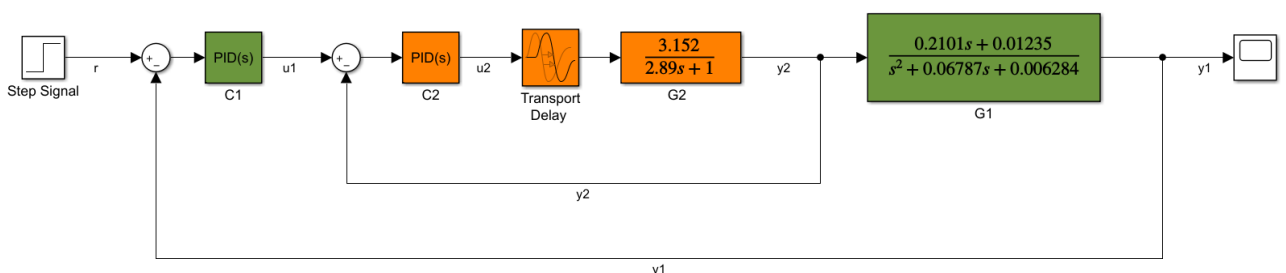


Рис. 4.1. Структурна схема моделювання каскадної САР

Каскадна система управління є багаторівневою стратегією, в якій вихідний сигнал зовнішнього регулятора формує задане значення для внутрішнього регулятора, що робить цей підхід особливо придатним для систем з різними тимчасовими характеристиками. У контексті водогрійної котельні установки, де швидкі зміни тиску пари контрастують з повільнішою динамікою нагріву води, каскадне управління дозволяє ефективно розділяти завдання регулювання.

Внутрішній контур швидко реагує на обурення, пов'язані з подачею пари, такі як коливання тиску або витрати, мінімізуючи їх вплив на температуру води, яка регулюється зовнішнім контуром. Ця структура, детально описана у даному уривку, ілюструється на малюнку 4.1, де показані дві лінії зворотного зв'язку, що забезпечують взаємодію між регуляторами та об'єктом управління. Теоретична основа каскадного управління спирається на класичні роботи в галузі автоматичного регулювання, включаючи дослідження, присвячені багаторівневим системам, де наголошується на здатності таких систем покращувати придушення збурень і підвищувати точність регулювання. Зокрема, використання каскадного підходу в котельнях дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх факторів, таких як зміни навантаження або нестабільність подачі енергоресурсів, що робить його кращим вибором для автоматизованих систем, що потребують високої надійності та енергоефективності.

Проектування каскадної системи керування спирається на математичні моделі, розроблені у попередніх розділах дисертації, включаючи моделі теплообмінника та парового клапана, які були отримані з використанням методів параметричної ідентифікації. Модель теплообмінника, представлена у вигляді передавальної функції другого порядку, описує повільну динаміку процесу нагріву води з огляду на інерційність теплопередачі та теплову ємність системи. Ця модель, виражена як відношення, що включає коефіцієнт підсилення, коефіцієнт загасання і натуральну частоту, є основою настроювання зовнішнього контуру. Модель парового клапана, описана передавальною функцією першого порядку із запізненням, відображає швидку динаміку регулювання витрати пари, що робить її придатною для внутрішнього контуру.

Процес проектування починається з установки внутрішнього контуру, де застосовується ПІ-регулятор для забезпечення швидкого відгуку на зміни тиску або витрати пари. Налаштування параметрів ПІ-регулятора виконується за допомогою симуляційних методів у MATLAB/Simulink, що дозволяє досягти мінімального часу наростання та низького перерегулювання. Після стабілізації внутрішнього контуру налаштовується зовнішній контур, який використовує ПІД-регулятор для керування температурою води. Зовнішній контур враховує вже налаштований внутрішній контур як частину об'єкта управління, що дозволяє зосередитися на досягненні стійкого відгуку та мінімальної помилки в режимі, що встановився. Синтез системи у просторі станів, згаданий у уривку, надає додаткові можливості для застосування сучасних методів управління, таких як розміщення полюсів, що забезпечує точне управління динамічними характеристиками системи та підвищує її стійкість до зовнішніх збурень.

Проектування каскадної системи керування водогрійним котлом вимагає точного розуміння динаміки всіх його ключових компонентів та їхньої взаємодії. Для цієї мети застосовуються математичні методи моделювання, що дозволяють уявити процеси теплопередачі, динаміку витрати пари та поведінку регулюючого клапана у вигляді сукупності передавальних функцій та блоків з певними часовими характеристиками. Моделі створюються з урахуванням експериментальних даних шляхом параметричної ідентифікації і відбивають як інерційні властивості теплообмінника, і динаміку виконавчих механізмів. Це особливо важливо в умовах реальних промислових об'єктів, де процеси нагріву супроводжуються обуреннями, такими як коливання тиску пари, зміна витрати води або нестабільність температури уставки. Кожна з цих моделей не просто визначає окремий фізичний процес, але разом вони формують структуру, з урахуванням якої проектується контур управління.

Модель теплообмінника, що має повільну, але стійку динаміку, відображає основний об'єкт управління, на який впливає каскадна система. Паралельно з цим модель клапана, що є виконавчим механізмом, забезпечує швидку та точну реалізацію впливів, що управляють. Інтеграція цих моделей в єдину архітектуру управління дозволяє коректно реалізувати концепцію каскадного регулювання, де внутрішній контур стабілізує швидке обурення (подачу пари), а зовнішній, забезпечує точне стеження за температурою води, що нагрівається.

Саме математичний опис цих процесів стає відправною точкою для підбору параметрів ПІД-регуляторів, а також для моделювання перехідних процесів та стійкості усієї системи. Процес налаштування включає визначення коефіцієнтів пропорційної, інтегральної та диференціальної дії на основі бажаних характеристик: мінімізація перерегулювання, скорочення часу встановлення та стійкість до зовнішніх впливів.

На рисунку 4.2 наведено результати чисельного моделювання спроектованої каскадної системи управління.



Рис. 4.2. Результат моделювання каскадної САР

Модель була реалізована в середовищі MATLAB/Simulink і включала обидва раніше ідентифіковані об'єкти — теплообмінник і клапан керування потоком пари. У процесі моделювання були зафіксовані відгуки системи на стандартні входні дії ступінчасту зміну уставки температури та зовнішні обурення, що моделюють коливання тиску пари.

На графіках виразно виділено перехідні процеси: система демонструє швидкий і стійкий відгук, у своїй температура води виходить задане значення без значних коливань і з мінімальним перерегулюванням. Окремо зафіксована характеристика керованого об'єкта без включення регулятора, що дозволяє оцінити ефект застосування каскадної архітектури управління.

Значимість цього дослідження полягає у його здатності пов'язати теоретичне моделювання з практичним застосуванням, надаючи масштабоване та ефективне рішення для управління роботою котельні.

Нижче у таблиці 4.1 наведено оцінки якостей САР водонагрівального котла.

Таблиця 4.1.

Результати оцінок якостей вихідної САР

№	Параметр	Значення
1	Перерегулювання, %	76.3
2	Час регулювання, с	50.7
3	Час досягнення першого максимуму, с	5.81
4	Час наростання, с	1.99
5	Усталена похибка	0

У таблиці подано ключові показники продуктивності, які оцінюють динамічну поведінку вихідної системи управління.

Результати моделювання каскадної системи управління, представлені рисунку 4.2, демонструють значне поліпшення продуктивності проти вихідної одноконтурної системою, характеристики якої наведено у таблиці 4.1.

Вихідна система, як зазначено у уривку, характеризується високим перерегулюванням (76,3%) та тривалим часом встановлення (50,7 секунд), що свідчить про нестабільність та недостатню чуйність при реагуванні на обурення.

Піковий час (5,81 секунди) і час наростання (1,99 секунди) додатково підкреслюють обмеження одноконтурного підходу, незважаючи на досягнення нульової помилки в режимі. Введення каскадної системи управління, засноване на поділі завдань між внутрішнім та зовнішнім контурами, дозволяє суттєво знизити перерегулювання та скоротити час встановлення, що підтверджується результатами моделювання.

Внутрішній контур, що управляє положенням парового клапана, швидко компенсує зміни тиску пари, запобігаючи їх впливу на температуру води, тоді як зовнішній контур забезпечує точне стеження заданої температури.

4.2. Синтез системи управління у просторі станів

Синтез каскадної системи управління для автоматизованої водогрійної котельні в просторі станів є складним процесом, що вимагає структурованого підходу до налаштування регуляторів для забезпечення стабільності, високої продуктивності та точного регулювання параметрів системи.

У контексті даної роботи каскадна система управління включає два вкладені контури: внутрішній, що відповідає за швидкодіючий динаміку, пов'язану з керуванням витратою пари через регулюючий клапан, і зовнішній, орієнтований на підтримку повільних процесів, таких як температура води на виході котла.

Цей підхід дозволяє ефективно розділяти завдання управління, мінімізуючи вплив швидких збурень, таких як коливання тиску пари, на загальну стабільність системи, одночасно забезпечуючи точне стеження заданих параметрів температури. Процес синтезу починається з ізоляції та налаштування внутрішнього контуру, який має бути оптимізований для швидкого придушення збурень, після чого виконується налаштування зовнішнього контуру, що враховує динаміку вже стабілізованого внутрішнього контуру. Такий послідовний підхід, описаний у цьому уривку, гарантує, що система в цілому досягає оптимального балансу між оперативністю і стійкістю. Для реалізації цього процесу використовуються математичні моделі теплообмінника та парового клапана, перетворені з форми передавальних функцій у простір станів, що забезпечує більш повний опис динаміки системи та спрощує застосування сучасних методів керування, таких як розміщення полюсів та оптимальне керування.

Каскадна система управління, включає два рівні регулювання: внутрішній контур, який керує динамічною динамікою, пов'язаною з положенням парового клапана, і зовнішній контур, відповідальний за підтримання температури води на заданому рівні. Внутрішній контур, що працює в швидшому часовому масштабі, призначений для оперативного придушення збурень, таких як раптові зміни тиску пари, які можуть суттєво вплинути на теплопередачу в теплообміннику. Зовнішній контур, навпаки, фокусується на повільніших процесах, забезпечуючи стабільну теплову рівновагу та компенсуючи довгострокові зміни, такі як коливання попиту на гарячу воду.

Процес налаштування починається з ізоляції внутрішнього контуру, щоб гарантувати його стабільність та оптимальну продуктивність перед підключенням зовнішнього контуру. Для внутрішнього контуру, як зазначено у уривку, застосовується ПД-регулятор, параметри якого налаштовуються для мінімізації часу наростання та перерегулювання. Це особливо важливо, оскільки внутрішній контур безпосередньо впливає на здатність системи швидко реагувати на збурення, такі як зміни тиску пари, забезпечуючи стабільні вхідні дані для зовнішнього контуру. Після стабілізації внутрішнього контуру налаштовується зовнішній контур, який також використовує ПД-регулятор, але з урахуванням повільнішої динаміки теплообмінника. Налаштування зовнішнього контуру спрямоване на досягнення стійкого відгуку з мінімальною помилкою в режимі, що дозволяє системі підтримувати температуру води відповідно до заданих умов експлуатації. Такий послідовний підхід до налаштування, описаний у уривку, забезпечує узгоджену роботу обох контурів, мінімізуючи взаємодію між ними та підвищуючи загальну ефективність системи.

Перетворення математичної моделі системи з форми передавальної функції у простір станів, як у уривку, є ключовим етапом синтезу каскадної системи управління. Передавальні функції, хоч і корисні для аналізу в частотній області, мають обмеження при проектуванні складних систем з кількома входами та виходами (МІМО), а також при врахуванні нелінійності або складної динаміки. Подання в просторі станів, засноване на диференціальних рівняннях першого порядку, дозволяє повніше описувати внутрішні стани системи, такі як температура води в теплообміннику або положення парового клапана, та їх еволюцію в часі.

Перш ніж розпочати налаштування регулятора, необхідно перетворити модель системи з подання передавальної функції у форму простору станів. У той час як передавальні функції є корисним інструментом аналізу систем у частотній області, подання у вигляді простору станів пропонують більш повну структуру, особливо при аналізі та проектуванні контролерів для сучасних динамічних систем.

Підхід із використанням простору станів моделює систему за допомогою диференціальних рівнянь першого порядку, фіксуючи внутрішні змінні стани та їх еволюцію у часі.

Ці змінні стану забезпечують прямий опис динаміки системи, дозволяючи детально подати системи з кількома входами та кількома виходами (МІМО) та полегшуючи застосування передових методів управління.

Формула простору станів складається з набору рівнянь стану та рівняння виходу, виражених у матричній формі як

$$\begin{cases} x'(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = C^T + Du(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

де $x(t)$ – вектор змінних станів; $y(t)$ – вихід системи; $u(t)$ – вхідний сигнал; A – матриця станів; B – матриця керування; C – матриця виходу (спостережуваності); D – матриця прямого зв'язку.

Тут $x(t)$ – вектор стану, $u(t)$ – вхід, $y(t)$ – вихід, а A , B , C и D – системні матриці, що характеризують динаміку системи, зв'язок між входом та станом та вихід. Таке уявлення дозволяє краще зрозуміти керованість та спостережуваність системи - ключові поняття для розробки контролерів, що відповідають технічним вимогам.

Перехід до форми простору станів дає кілька переваг синтезу контролерів. Він спрощує інтеграцію сучасних методів управління, таких як розміщення полюсів та оптимальне управління, які не такі прості в галузі передавальної функції. Крім того, моделі простору станів особливо ефективні для аналізу у часовій області, що робить їх ідеальними для систем зі складною динамікою, збуреннями чи нелінійністю.

У контексті досліджуваного процесу нагріву моделювання простору станів послужить основою для подальшого проектування контролерів, забезпечуючи структурований підхід для досягнення оптимальної продуктивності, стабільності та стійкості.

Щоб перетворити задану передатну функцію на її уявлення у просторі станів, ми спираємося на фундаментальні концепції теорії управління та сучасної динаміки систем. Процес починається з розкладання передавальної функції, продовжується виведенням диференціальних рівнянь і завершується виразом системи у матричній формі.

Використовуючи спочатку отриману модель у вигляді передавальної функції (3.2), яка є лінійною системою другого порядку, де знаменник описує динаміку системи, а чисельник залежність для виходу системи.

Щоб систематично вивести модель простору станів, знаменник та чисельник розглядаються окремо, що відповідає концепції, згідно з якою уявлення простору станів відображає як внутрішню динаміку системи (рівняння стану), так і поведінку на виході (рівняння виходу).

Для цього представимо модель у вигляді двох ланок

$$G_1(s) = \frac{1}{s^2 + 0.06787s + 0.006284}, \quad (4.2)$$

$$G_2(s) = 0.2101s + 0.01235 \quad (4.3)$$

На рисунку 4.3 представлена перетворена структурна схема передавальної функції.

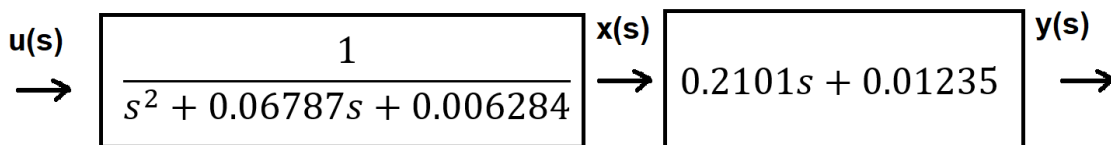


Рис. 4.3. Перетворена структурна схема передавальної функції

Тоді можемо записати співвідношення у вигляді

$$\frac{1}{s^2 + 0.06787s + 0.006284} = \frac{x(s)}{u(s)} \quad (4.4)$$

При множенні на знаменник залежність стає рівною

$$(s^2 + 0.06787s + 0.006284)x(s) = u(s) \quad (4.5)$$

де $x(s)$ – проміжна змінна стану; $u(s)$ – вхідний сигнал.

У часовій області це рівняння перетворюється на диференціальне
рівняння другого порядку

$$x'' + 0.06787x' + 0.006284x = u(s) \quad (4.6)$$

Введемо змінні стани, щоб розбити це рівняння другого порядку на набір рівнянь першого порядку, які потрібні форми простору станів. Визначивши стан як

$$\begin{cases} x_1(t) = x(t) \\ x_2(t) = x_1'(t) \end{cases} \quad (4.7)$$

Можна виразити похідні станів в такий спосіб

$$\begin{cases} x_1'(t) = x_2 \\ x_2'(t) = -0.006284x_1(t) - 0.06787x_2 + u(t) \end{cases} \quad (4.8)$$

Ці рівняння описують, як стану системи змінюються у часі залежно від вхідного сигналу $u(t)$ та динаміки системи.

Щоб виразити це в матричній формі, ми об'єднаємо рівняння стану компактно векторну нотацію

$$\begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.006284 & -0.06787 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (4.9)$$

Тут матриця, що множить вектор стану, відображає внутрішню динаміку (А-матриця), а вектор-стовпець, помножений на $u(t)$, представляє вхідний вплив (В-матриця).

Далі розглянемо чисельник передавальної функції, яка пов'язує вихід системи із її станами. Переписавши її, маємо

$$\frac{y(t)}{x(t)} = 0.2101s + 0.01235 \quad (4.10)$$

Або еквівалентно у тимчасовій області

$$y(t) = 0.2101x'(t) + 0.01235x(t) \quad (4.11)$$

Використовуючи змінні стану x_1 і x_2 , де $x_2 = x_1'$, рівняння виходу стає

$$y(t) = 0.2101x_2 + 0.01235x_1 \quad (4.12)$$

У матричному вигляді це також можна записати у вигляді

$$y(t) = [0.01235 \ 0.2101] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Тут вектор рядки, помножений на вектор стану, є вихідною залежністю (С-матриця), і немає прямої передачі від входу $u(t)$, що означає, що D-матриця дорівнює нулю.

Комбінуючи рівняння стану та рівняння виходу, отримуємо повне уявлення простору станів

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.006284 & -0.06787 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = [0.01235 \quad 0.2101] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4.14)$$

Модель у просторі станів забезпечує сучасне та універсальне уявлення вихідної передавальної функції. Явно моделюючи внутрішні стани системи, стає простіше застосовувати передові методи управління, такі як зворотний стан, оптимальне управління і розробка спостерігачів.

На відміну від форми передавальної функції, подання у вигляді простору станів добре підходить для систем з кількома входами та кількома виходами (МІМО) та дозволяє проводити простий аналіз у часовій області.

У цьому дослідженні отримана модель простору станів послужить основою для проектування та налаштування регуляторів системи опалення котла. Вона забезпечує точне моделювання динаміки, полегшуючи синтез надійних та стабільних стратегій управління.

Перехід від передавальних функцій до моделей простору станів відповідає сучасним методам, які у дослідженнях і практиці управління сучасними об'єктами.

Для перевірки еквівалентності передавальної функції та просторового уявлення стану ми проводимо симуляцію реакції обох моделей на ідентичний вхідний сигнал.

Цей процес гарантує, що динамічна поведінка, відображена в передавальній функції, представлена в моделі простору станів. Така конвертація дозволяє перейти від одного виду опису системи до іншого, зручнішого для аналізу, синтезу регуляторів та моделювання в інтегрованих середовищах. Використовуючи стандартні інструменти моделювання систем, такі як MATLAB або Simulink, ми подаємо заздалегідь заданий вхідний сигнал, наприклад одиничний сигнал, і аналізуємо результуючий вихідний сигнал з обох формул.

Збіг або мінімальна розбіжність вихідних сигналів підтверджує еквівалентність двох форм подання моделі та коректність перетворення.

Для перевірки еквівалентності моделі простору станів та вихідної передавальної функції проводиться моделювання в MATLAB/Simulink, де на обидві моделі подається однаковий вхідний сигнал, наприклад, одиничний ступінчастий сигнал. Результати цього моделювання, представлені рисунку 4.4, демонструють ідентичне поведінка обох моделей, що підтверджує коректність перетворення.

Графік перехідного процесу, показаний на малюнку 4.4, ілюструє, що відгук системи у просторі станів збігається з відгуком, передбаченим передавальною функцією, що підкреслює точність математичного опису та його придатність для подальшого синтезу регуляторів.

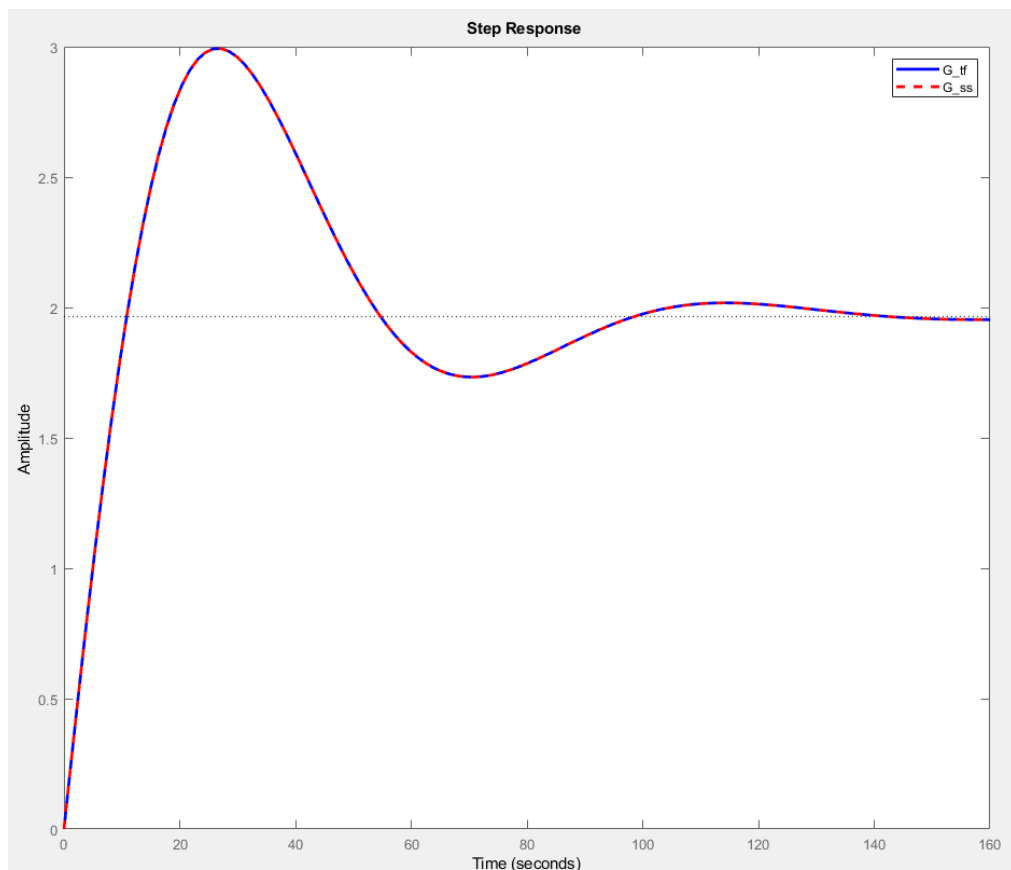


Рис. 4.4. Графік перехідного процесу

Цей етап перевірки є критично важливим, оскільки будь-яка помилка у перетворенні моделі могла б призвести до некоректного настроювання регуляторів, що негативно позначилося б на продуктивності каскадної системи управління.

Використання MATLAB/Simulink забезпечує зручний інтерфейс для проведення таких симуляцій, дозволяючи візуалізувати перехідні процеси та аналізувати ключові характеристики, такі як час наростання, перерегулювання та час встановлення.

З графіка перехідної характеристики малюнку 4.4 видно, що обидві системи поведуться однаково. Це підтверджує математичну та динамічну еквівалентність передавальної функції та моделі простору станів. Конгруентність цих моделей підкреслює точність процесу перетворення простору станів та підтверджує його придатність для подальшого проектування та аналізу систем управління.

Цей крок має важливе значення для того, щоб отримана модель простору станів зберігала основні характеристики вихідної системи, що дозволяє точно налаштувати контролер і забезпечувати надійну роботу системи.

Коректність такого перетворення гарантує, що це динамічні властивості, властиві вихідної передавальної функції, адекватно відбито у новій формі, включаючи її стійкість, швидкодію і реакцію на обурення. Це особливо критично для подальшого проектування робастних регуляторів, заснованих на методах теорії автоматичного керування, що потребує подання системи саме у вигляді простору станів.

4.3. Синтез модального регулятора

Для синтезу системи керування методом розміщення полюсів визначається бажана динаміка системи шляхом задання необхідної степені стійкості рівного 2. Виходячи з цієї степені стійкості, розраховуються

$$\text{корені характеристичного полінома замкнутої системи} \quad s_1 = -\frac{1}{6} \text{ і } s_2 = -\frac{1}{2},$$

які є бажаними місцями розташування полюсів замкнутої системи. Процес починається з формування матриці керованості H_1 , яка забезпечує керованість системи та можливість успішного розміщення полюсів. Для даної системи матриця керованості будується за матрицею стану A та вхідною матрицею B наступним чином

$$H_1 = [A * B; B] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.0063 & -0.0679 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.0679 & 1 \end{bmatrix}$$

Далі виводяться характеристичні поліноми для систем із розімкненим та замкнутим контуром. Характеристичний поліном системи з розімкненим контуром виходить шляхом обчислення визначника, внаслідок чого

$$\det(sI - A) = \det\left(s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.0063 & -0.0679 \end{bmatrix}\right),$$

$$\det(sI - A) = \det\left(\begin{bmatrix} s & -1 \\ 0.0063 & s + 0.0679 \end{bmatrix}\right) = s^2 + 0.0679s + 0.0063$$

Для замкнутої системи характеристичний поліном визначається, виходячи із бажаного розміщення полюсів $s_1 = -\frac{1}{6}$ $s_2 = -\frac{1}{2}$. Це дає

$$\det(sI - D) = \left(s + \frac{1}{6}\right)\left(s + \frac{1}{2}\right) = s^2 + 0.6667s + 0.08333$$

Щоб привести динаміку системи у відповідність до бажаної поведінки, формується допоміжний вектор d шляхом віднімання коефіцієнтів полінома розімкнутого контуру з коефіцієнтів полінома замкнутого контуру

$$d = c - a = \begin{bmatrix} c_2 \\ c_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_2 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.08333 \\ 0.6667 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.0063 \\ 0.0679 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0770 \\ 0.5988 \end{bmatrix}$$

Потім обчислюється матриця коефіцієнта посилення K . Для цього необхідно сформулювати H_2 та визначити її обернену величину для вирішення K . Отриманий вектор посилення має вигляд

$$K = Q^{-1} * d = \begin{bmatrix} 0.0770 \\ 0.5988 \end{bmatrix}$$

Розроблений закон управління виражається так

$$u(t) = - \begin{bmatrix} 0.0770 \\ 0.5988 \end{bmatrix}^T * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0.0770x_1(t) - 0.5988x_2(t) \quad (4.15)$$

Нарешті, для підтвердження правильності розташування полюсів та обчислень перевіримо за допомогою функції MATLAB `acker`. Результати, показані малюнку 4.6, який підтверджує точність обчислених параметрів управління та стійкість синтезованої системи.

Цей метод демонструє ефективне використання розміщення полюсів для досягнення точної динаміки управління та наголошує на практичному застосуванні моделювання простору станів та методів лінійної алгебри в сучасному проектуванні систем управління.

На рисунку 4.5 представлено графічне порівняння перехідного відгуку системи із застосуванням регулятора та без нього. Графік наочно демонструє значне поліпшення параметрів системи при застосуванні регулятора.

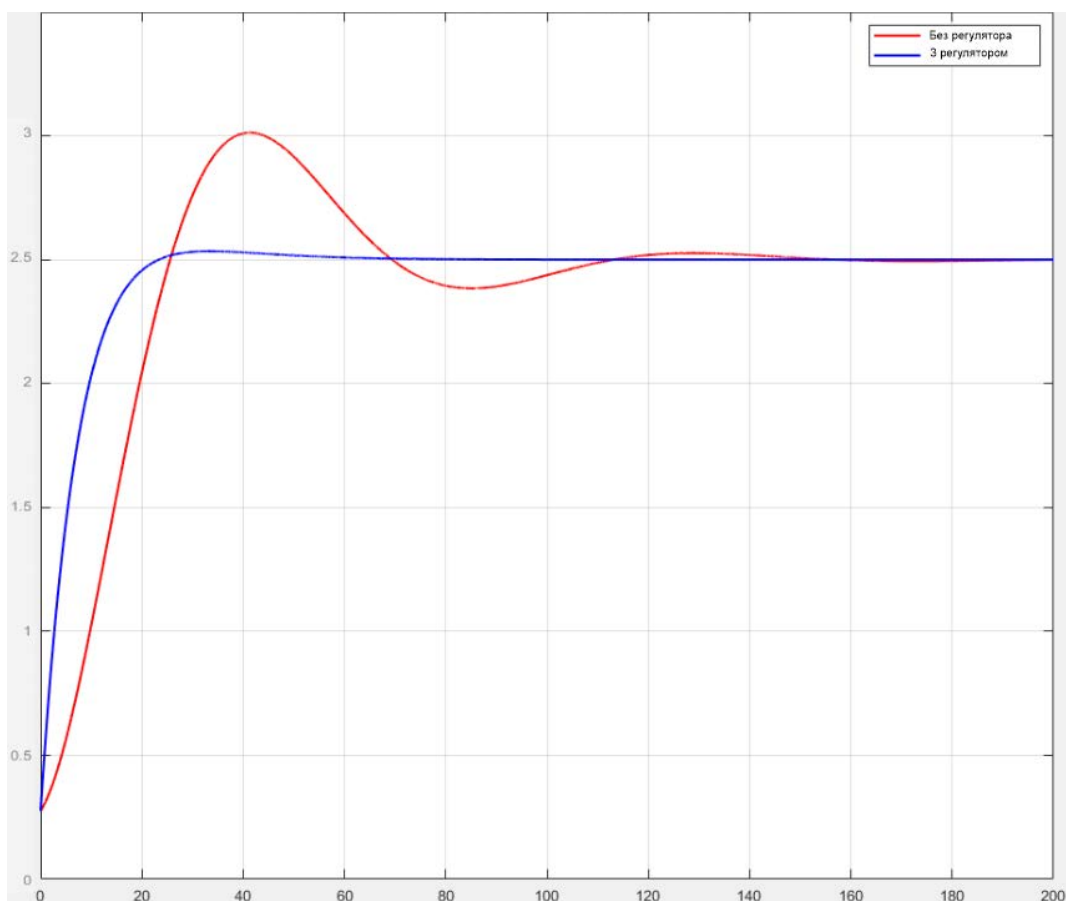


Рис. 4.5. Порівняння об'єкта «без» та «з» регулятором

Червона крива реакцію системи без регулятора. Вона демонструє велике перерегулювання, за яким слідує коливальна поведінка і тривалий час регулювання. Системі потрібний значний час для стабілізації, і вона демонструє погані характеристики демпфування, про що свідчать постійні коливання.

З іншого боку, синя крива ілюструє реакцію системи із встановленим контролером. Тут система демонструє набагато стабільніший відгук.

Перевантаження різко зменшилася, а перехідна поведінка швидко стабілізується без вагань, що свідчить про ефективність системи управління досягнення бажаної стабільності і динамічних характеристик.

Отримана модель системи було реалізовано рамках каскадної системи управління з оцінки її ефективності. Каскадна система управління підвищує стабільність та динамічний відгук всього процесу за рахунок використання внутрішнього контуру управління для усунення збурень до того, як вони поширяться на зовнішній контур.

На рисунку 4.6 представлена схема моделювання, що використовується для аналізу поведінки системи при цій конфігурації. Ця схема забезпечує структурований підхід до перевірки покращеної перехідної характеристики, оцінки стабільності системи та порівняння результатів з вихідною системою управління.

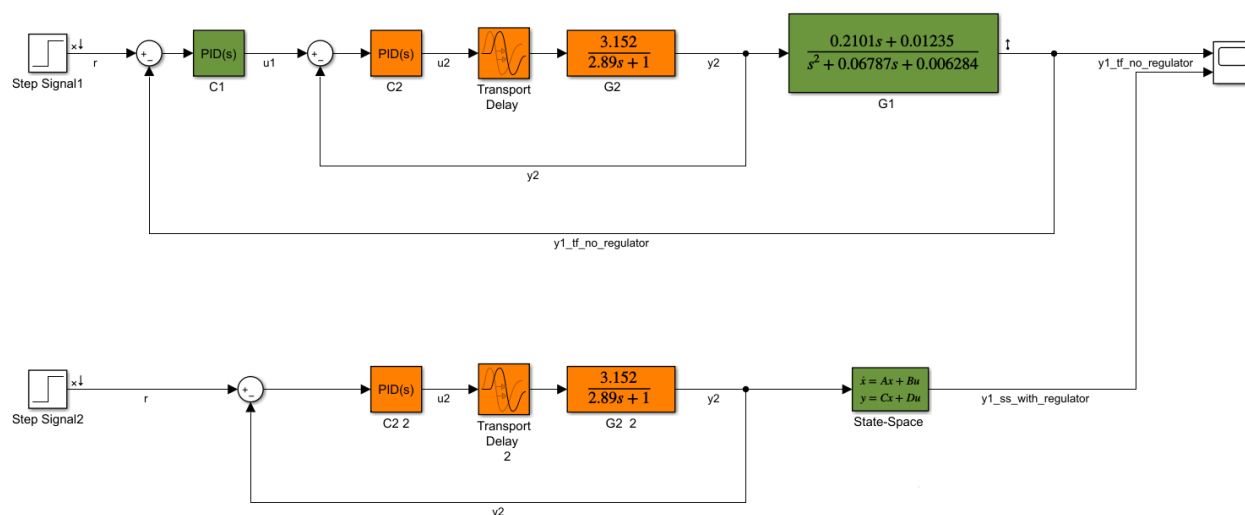


Рис. 4.6. Схема моделювання каскадної системи без регулятора та з регулятором

На малюнку 4.7 наведено графік результатів моделювання.

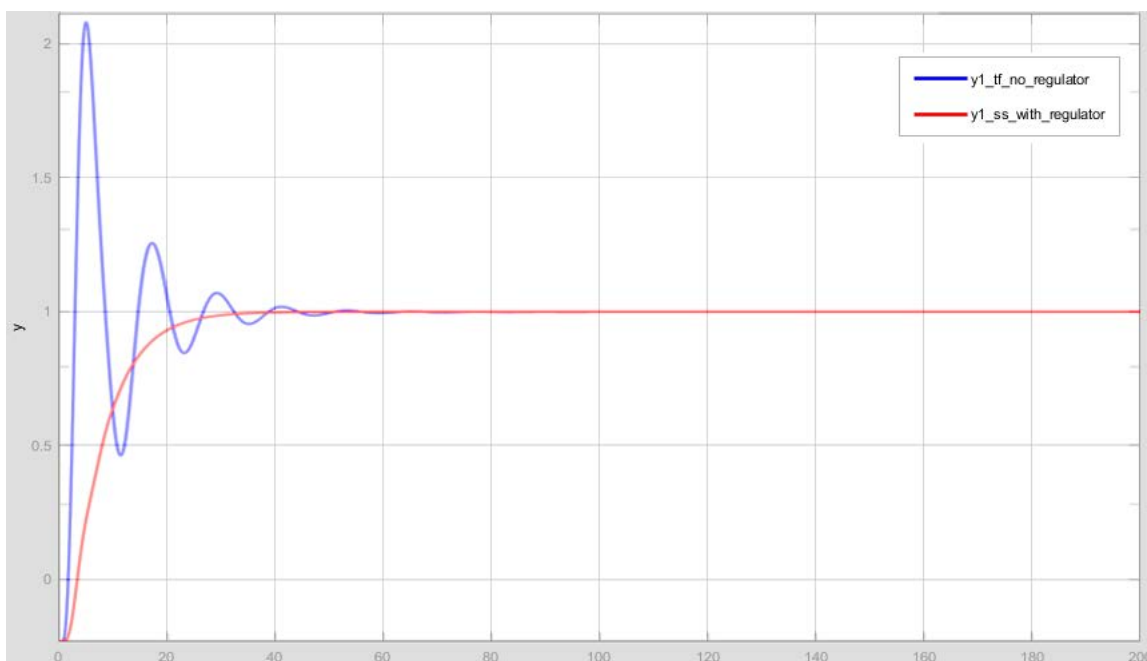


Рис. 4.7. Порівняння каскадної САР за допомогою регулятора

На графіку видно, що система без регулятора демонструє значні коливання, перевантаження і повільний вихід на режим, що встановився. Навпаки, система з регулятором демонструє набагато стабільніший і добре плавніший відгук, зі значно меншим перерегулюванням та швидшим часом встановлення.

У таблиці 4.2 наведено оцінку показників обох змін, кількісно визначає поліпшення, внесені регулятором. Ключові показники, такі як перерегулювання, час встановлення та стабільність, підтверджують ефективність методу розміщення полюсів у підвищенні якості системи.

Таблиця 4.2

Результати оцінок якостей каскадної САР із регулятором

№	Параметр	Без Регулятора	З Регулятором
1	Перерегулювання, %	76.3	1-2%
2	Час регулювання, с	50.7	46.9
3	Час досягнення першого максимуму, с	5.81	42.5
4	Час наростання, с	1.99	18.9
5	Усталена похибка	0	0

Хоча регулятор вносить невелику затримку в початковий відгук системи, цей компроміс є прийнятним, враховуючи значні переваги стабільності та точності.

Висновки до розділу 4

Отже, слід зазначити, що розробка та впровадження каскадної системи управління значно підвищує стабільність та точність системи управління.

Найбільш помітним покращенням є суттєве зниження перерегулювання – з 76,3% без регулятора до мінімальних 1-2% із регулятором. Це зниження має вирішальне значення для забезпечення стабільності системи та запобігання можливим коливанням через надмірне відхилення від заданого значення.

Здатність регулятора підтримувати нульову помилку в режимі, що встановився, ще раз підкреслює його ефективність у досягненні бажаних характеристик без тривалих розбіжностей, сприяючи підвищенню загальної точності системи.

Крім того, регулятор покращує час регулювання, трохи зменшуючи його з 50,7 секунд до 46,9 секунд, що свідчить про більш ефективне зближення з бажаною уставкою.

Ці результати показують, що розробка регулятора призводить до створення більш керованої та надійної системи, що є особливо цінним для додатків, що вимагають високої стабільності та мінімальної похибки.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ ОБ'ЄКТА

5.1. Розробка системи управління MD PID із системою Honeywell PKS

Модельно-орієнтоване PID-регулювання (Model-Driven PID, MD PID) є підхід до проектування та налаштування регуляторів, при якому параметри ПІД-регулятора обчислюються на основі математичної моделі об'єкта управління, а не емпірично. У класичній схемі ПІД-регулювання MD PID передбачає, що для заданого процесу будується його динамічна модель (передаточна функція або модель стану), після чого на основі цієї моделі та заданих критеріїв якості формулюється завдання оптимізації, рішення якої дає оптимальні коефіцієнти регулятора.

Такий метод дозволяє врахувати динамічні характеристики системи заздалегідь і, як правило, призводить до більш швидкого та точного встановлення необхідних параметрів регулятора. Формально, маючи модель об'єкта і задавши, наприклад, критерій оптимальності (мінімізація інтегральної помилки регулювання), можна аналітично чи чисельно обчислити величини коефіцієнтів ПІД, що забезпечують необхідну якісну характеристику траєкторії перехідного процесу.

Важливими властивостями MD PID є його здатність автоматично враховувати динаміку системи під час налаштування регулятора. Так, MD PID дозволяє "адаптувати" контролер до змін характеристик процесу: оскільки параметри регулятора обчислюються виходячи з моделі, що враховує умови роботи об'єкта, при зміні динаміки (наприклад, зміні коефіцієнта передачі або часу запізнення) можна оперативно перерахувати нові параметри без тривалих дослідів "на реальному устаткуванні".

Це означає, що MD PID підвищує стійкість та точність керування в порівнянні з класичними регуляторами. Справді, за результатами досліджень Панченка та Ширяєвої, застосування MD PID у системі керування водогрійним котлом показало суттєве покращення продуктивності регулювання та стабільності порівняно з традиційними ПІД-регуляторами.

Крім того, при використанні моделі полегшується автоматизоване налагодження: система може проводити моделювання ступінчастих збурень та автоматично оцінювати перехідні характеристики, що прискорює налаштування параметрів регулятора.

5.2. Інтеграція моделі об'єкта в середовище Honeywell PKS

Система управління Experion PKS (Process Knowledge System) компанії Honeywell є найсучаснішим розподіленим контролером (DCS), призначеним для автоматизації складних технологічних процесів. Для реалізації MD PID важливо забезпечити обмін даними між цифровою моделлю об'єкта та реальною системою керування. В цьому дослідженні зв'язок між моделлю котла (в середовищі MATLAB/Simulink) і системою Honeywell Experion PKS був організований через стандарт промислової автоматики OPC (Open Platform Communications).

Як посередник використовувався Matrikon OPC Server, який виступав сполучною ланкою між MATLAB та системою Experion PKS.

За допомогою MATLAB OPC Data Explorer Toolbox встановлюється з'єднання з Matrikon OPC Server, а той, у свою чергу, "бачить" теги та змінні, налаштовані в системі Experion PKS. На стороні контролера Honeywell були створені спеціальні змінні (теги) для запису та читання значень ключових параметрів процесу – наприклад, сигналів від датчиків температури та тиску, а також команд на виконавчі пристрої (наприклад, положення регулюючих клапанів).

Кожна така змінна налаштовується в PKS із зазначенням типу даних, частоти оновлення та прав доступу (читання/запис), що забезпечує надійну передачу даних між системою та зовнішнім ПЗ.

На рисунку 5.1 наведено конфігурацію OPC з боку MATLAB OPC Data Explorer Toolbox. Ця настройка забезпечує прямий зв'язок між середовищем MATLAB та промисловими системами керування, дозволяючи здійснювати читання та запис даних у реальному часі з використанням протоколу OPC.

Цей інтерфейс є мостом між високорівневим середовищем математичного моделювання MATLAB та системами автоматизації нижнього рівня, забезпечуючи безпосередній доступ до даних технологічного процесу в реальному часі.

У цьому вікні відбувається налаштування параметрів з'єднання, включаючи вибір OPC-сервера, перегляд та вибір доступних тегів (змінних процесів), а також конфігурування параметрів обміну даними, таких як частота оновлення. Це є критично важливим для збору актуальних експериментальних даних, які надалі використовуються для параметричної ідентифікації математичних моделей об'єкта управління.

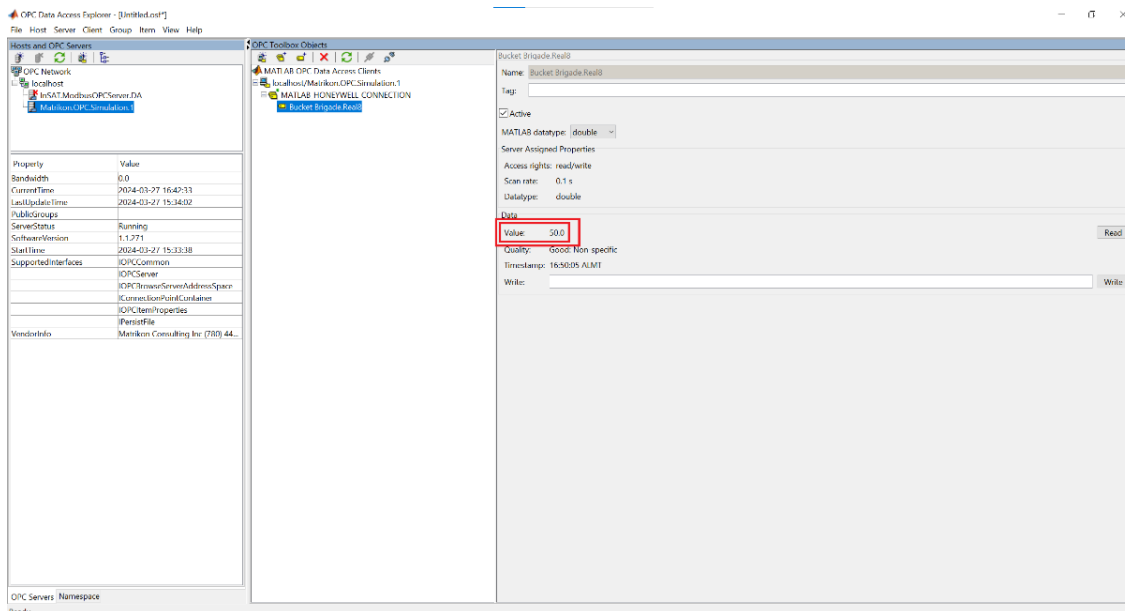


Рис. 5.1. Конфігурація підключення MATLAB OPC Data Explorer Toolbox

Після встановлення з'єднання між MATLAB та OPC-сервером Honeywell PKS за допомогою Matrikon, дозволяє не тільки зчитувати реальні дані процесу в MATLAB для аналізу та побудови моделей, але й у зворотному напрямку передавати розраховані команди управління на контролер. Це забезпечує двонаправлений зв'язок: так, параметри моделі та результати ідентифікації з MATLAB можуть впливати на поведінку регуляторів у Experion PKS у режимі реального часу. Ця інтеграція («цифровий двійник» котла, пов'язаний із реальною системою через OPC) дозволяє проводити розширений аналіз – наприклад, проганяти на моделі різні сценарії навантаження та автоматично підлаштовувати алгоритм керування без втручання у реальну технологію.

Для ефективної взаємодії зі змінними, розміщеними на OPC-сервері, серед MATLAB використовуються спеціалізовані функції, що забезпечують двонаправлений обмін даними – як читання, так і запис.

Ілюстрацію основних операцій взаємодії зі змінними OPC наведено на прикладі коду, що демонструє типовий робочий процес.

Початковим етапом роботи з OPC є створення об'єкта OPC в MATLAB, який є посередником для встановлення зв'язку з OPC-сервером. У цьому прикладі формується об'єкт `opcObj`, який ініціалізує підключення до OPC-сервера `Matrikon OPC Simulation`.

Вибір симуляційної бібліотеки `Matrikon OPC Simulation` обумовлений її зручністю для тестування, налагодження та розробки алгоритмів без необхідності підключення до реального обладнання, що дозволяє імітувати різні сценарії роботи.

Після успішного створення об'єкта `opcObj` наступним кроком є встановлення активного з'єднання з сервером OPC. Для цього використовується функція `connect`, яка ініціює сеанс зв'язку та відкриває канали для обміну даними. Факт успішного підключення до сервера верифікується системою, після чого стає можливим приступити до операцій читання та запису даних.

Припустимо, на OPC-сервері існує змінна під назвою `Random.Real8`, значення якої потрібно отримати. Для зчитування поточного значення цієї змінної використовується функція `read`.

В даному випадку отримане значення буде записано в змінну `data` в робочій області MATLAB. Важливо підкреслити, що дані, передані за протоколом OPC, можуть оновлюватися у часі, що дозволяє користувачеві відстежувати динамічні зміни у технологічному процесі і приймати оперативні рішення з урахуванням актуальної інформації.

У результаті архітектура системи виходить такою: `Honeywell PKS` забезпечує збирання та контроль польових сигналів (температура, тиск, рівні), а `MATLAB/Simulink` за допомогою OPC виступає як «віртуальний процесор», що підтримує модель динаміки котла і служить платформою для розрахунку параметрів MD PID.

Така схема дає гнучкість: оператор може спостерігати дані на стандартних панелях управління `Experion`, а інженери з автоматизації працювати з моделлю в `MATLAB`, отримувати прогнози і завантажувати оптимальні налаштування назад в `PKS`.

На рисунку 5.2 наведено схему моделювання каскадного управління.

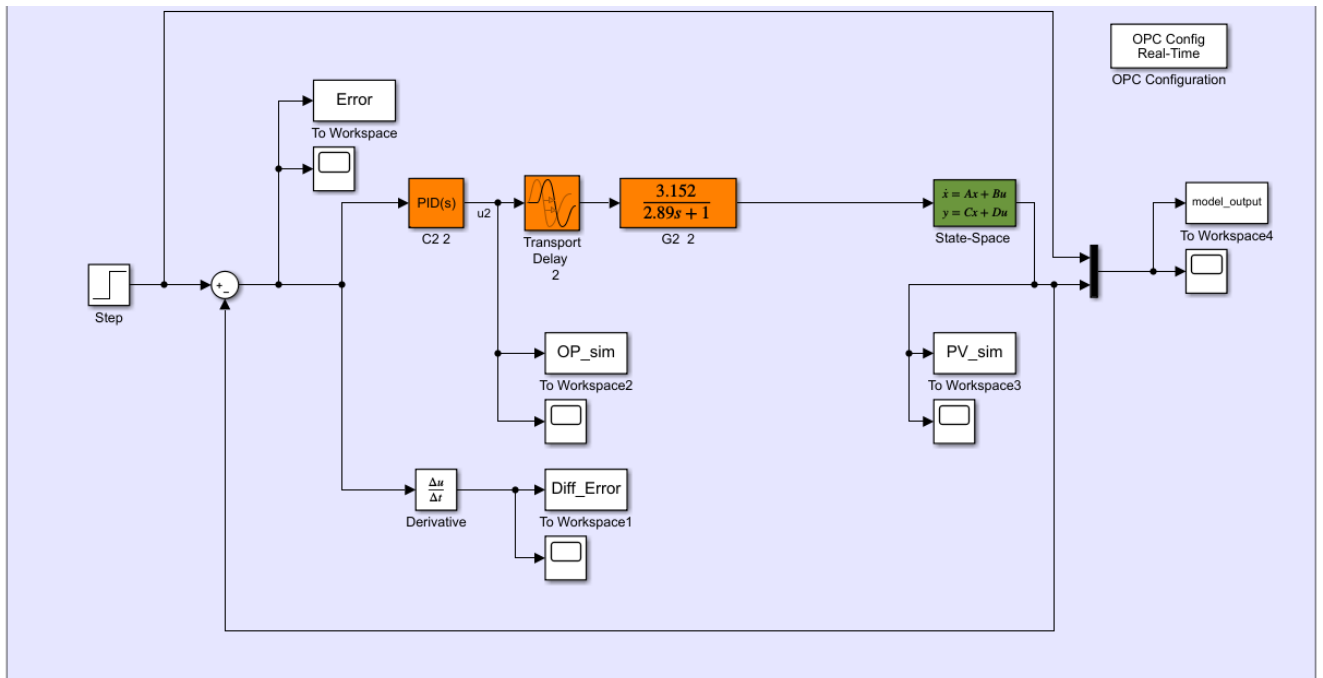


Рис. 5.2. Моделювання системи керування для роботи з OPC

Середовище Experion PKS надає потужний інструментарій для конфігурування та налаштування регуляторів різного типу, включаючи одноконтурні PID-блоки та каскадні структури. По-перше, Experion є стандартні функціональні блоки (PIDA, PIDR, PID), що реалізують класичну ПІД-логіку з можливістю ручного або автоматичного підстроювання коефіцієнтів. Конфігурування ПІД-регулятора здійснюється через графічний інтерфейс Project Builder: вказуються змінна, що керує, регульований параметр і початкові оцінки коефіцієнтів. Ключовим моментом є інтеграція з моделлю об'єкта: наприклад, після ідентифікації моделі котла в MATLAB отримані значення можна ввести у відповідні поля блоку PID в Experion.

Для каскадної структури управління Experion використовуються два регулятори, один (вторинний) жорстко пов'язані з виконавчим механізмом (наприклад, з сервоприводом клапана), а інший (первинний) задає уставку другому регулятору.

Така конфігурація (наприклад, верхній контур задає потрібну температуру на виході теплообмінника, а нижній – керує подачею пари/пального) дозволяє краще виділяти динаміки та зменшує вплив зовнішніх збурень.

У Experion налаштування каскадного контуру включає вибір зовнішнього і внутрішнього регуляторів, а потім послідовне налаштування: спочатку, як правило, налаштовується внутрішній (швидкодіючий) регулятор, а потім зовнішній.

Документація Honeywell підтверджує, що в Experion передбачено спеціальну функцію Setup and tuning Cascade loops для покрокового налаштування таких багаторівневих систем.

Після конфігурації регуляторів на етапі виконання системи оператор може моніторити їхню поведінку через засоби візуалізації Experion. Час-значення реакції процесів відображаються на трендах (діаграмах), доступних у Runtime.

ПІД-блоки мають графічні лицьові панелі з індикаторами поточних помилок, уставок та вихідних сигналів, що полегшує налагодження та контроль якості регулювання. Більше того, оскільки регулятори налаштовані з урахуванням цифрової моделі об'єкта, спостерігається покращена точність виконання завдання та менші перерегулювання порівняно з налаштуваннями, отриманими традиційним «перебором» параметрів.

Таким чином, Experion PKS надає повний цикл синтезу MD PID-регулювання: від впровадження математичної моделі об'єкта (через OPC-обмін із MATLAB) до автоматичного підстроювання коефіцієнтів та експлуатації на реальному об'єкті.

Комбінація обчислювальних засобів Matlab/Simulink та можливостей DCS дозволяє виконувати ідентифікацію, оптимізацію та реальне управління в єдиному інформаційному контексті. Це дає інженеру можливість одного разу провести моделювання та аналіз, а потім «завантажити» результати в систему управління, мінімізуючи ручне налаштування та скорочуючи час, що витрачається на налагодження контрольного контуру.

На прикладі водогрійного казана MD PID-регулювання демонструє свої переваги. У контексті котлоагрегату управління процесом зводиться до підтримки необхідного тиску та температури води: температура води безпосередньо впливає на утворення пари і, відповідно, тиск у котлі.

У реальному об'єкті завдання керування нерідко поділяються на кілька контурів: наприклад, контур рівня води, контур температури та контур тиску.

При аналізі була використана наступна логіка: подача пари на теплообмінник і витрата води підтримувалися постійними, а потім генератор ШІМ (або аналогічний) створював ступінчасту зміну впливу, що управляє.

Практично це означає, що цифрова модель котла (включаючи баланс тепла та динаміку пароутворення) служить двигуном для розрахунку коефіцієнтів PIDA: регулятор автоматично враховує теплоємність котла, інерцію пароутворення та реактивну складову зміни тиску.

У реальній системі автоматизації подібну архітектуру можна реалізувати через каскадні ПІД-контролери Honeywell PKS. Наприклад, у зовнішньому контурі може стояти ПІД-регулятор тиску котла, що задає уставку внутрішньому контролеру подачі пального (або пари).

Такий підхід дозволяє швидше реагувати на обурення на вході (зміна навантаження) завдяки швидкій внутрішній петлі, а зовнішній контур забезпечує підтримку точного значення тиску. Experion PKS підтримує подібне каскадне з'єднання PIDA-блоків та дозволяє гнучко налаштовувати зв'язки між ними. Тим самим було MD PID практично може бути реалізований як каскаду: внутрішній регулятор «стежить» за динамікою виконавчого механізму, а зовнішній – тиском; модель котла при цьому допомагає оцінювати, як зміна подачі енергії вплине на тиск та коригувати коефіцієнти обох регуляторів.

Особливості водогрійних котлів (велика теплоємність води, перехід фаз, нелінійності при конденсації/випаровуванні) роблять традиційне накладання класичних ПІД-параметрів скрутним, що вимагає багато практичних підгонок.

MD PID дозволяє мінімізувати ці проблеми: після разової ідентифікації моделі котла в широкому діапазоні працюючого навантаження регулятори, налаштовані за моделлю, зберігають адекватність при зміні умов (наприклад, при частковому навантаженні котла), так як модель враховує фізичні параметри системи. Таким чином, використання модельно-орієнтованого підходу в котлоагрегатах не тільки прискорює параметрів заданих вимог.

MD PID-регулювання має низку істотних переваг перед класичним ПІД-підбиранням. По-перше, застосування моделі процесу розрахунку параметрів дозволяє значно прискорити виведення системи на необхідний режим: відпадає необхідність великої кількості ітеративних експериментів «в польових умовах», оскільки всі обчислення проводяться на цифровій моделі об'єкта.

Це підвищує стабільність регулювання, оскільки помилки першої апроксимації зводяться до мінімуму вже на етапі розрахунку параметрів.

По-друге, MD PID забезпечує кращу адаптивність: при зміні динамічних властивостей (наприклад, температури навколишнього середовища або зносу обладнання) можна перерахувати коефіцієнти, тоді як класичні регулятори вимагають повторного налаштування. Завдяки автоматичній оптимізації коефіцієнтів управління швидше встановлюється на нове значення без переналаштування вручну.

Не менш важливим є той факт, що MD PID легко інтегрується в концепцію «цифрового двійника» виробничої системи. Цифровий двійник – це віртуальна модель реального об'єкта чи процесу, що створюється з урахуванням даних сенсорів і фізики процесу. Він дозволяє не тільки проводити оффлайн-симуляцію, а й в онлайн-режимі синхронізуватися з реальним процесом: у цьому випадку цифрова модель котла постійно отримує актуальну інформацію про параметри процесу з Honeywell PKS і, при необхідності, оновлює свої розрахунки. За визначенням цифровий двійник «відбиває поведінку фізичного аналога» і може бути використаний для прогнозування та оптимізації роботи до внесення змін до реальної системи.

У контексті MD PID цифровий двійник котла дозволяє тестувати алгоритми регулювання на віртуальній копії, проводити передиктивну аналітику та гарантувати, що параметри, що впроваджуються, будуть працювати стабільно. Це веде до підвищення надійності та безпеки: будь-які помилки можна виявити на моделі без ризику для реального обладнання.

На додаток цифровий двійник поєднує функції моделювання та контролю: дані реального процесу надходять у модель (наприклад, через OPC з'єднання), а розраховані на її основі коригувальні дії повертаються до системи управління. Такий двонаправлений потік даних («двосторонній зв'язок цифрового двійника з фізичним процесом») відкриває можливості для просунутих методів автоматизації – адаптивного керування, передиктивної оптимізації, самоналаштування алгоритмів. Тому роль цифрового двійника та MD PID у промисловій автоматизації важко переоцінити: вони дозволяють поєднувати багатство інформації та обчислювальних моделей з досвідом експлуатації реальних установок для досягнення найкращого балансу стійкості, точності та ефективності роботи котелень.

Таким чином, інтегрування модельно-орієнтованих ПІД-регуляторів у платформу Honeywell Experion PKS забезпечує сучасний підхід до автоматизації водогрійних котелень. Це поєднання математичної ідентифікації, автоматизованого налаштування регуляторів, підтримки каскадних структур та візуалізації результатів відповідає вимогам інженерної дисертації: систематизовано та докладно описано всі етапи від створення моделі об'єкта до її практичного використання в системі управління, що підтверджується даними джерел. Приступаючи до налаштування ПІД-регулятора для системи водонагрівальної установки, основним завданням є забезпечення стабільної та точної підтримки температури води (PV) на заданому рівні (SP) за рахунок регулювання витрати пари (OP) через клапан. На основі проведених експериментів та застосування методів ідентифікації

Метою налаштування було досягнення оптимальної перехідної характеристики: мінімізація часу регулювання, зниження перерегулювання та усунення статичної помилки.

Результати налаштування ПІД-регулятора, представлені на рисунку 5.3, наочно демонструють досягнуту ефективність. Жовта лінія (OP) показує керуючий вплив на клапан витрати пари, тобто його поточне положення або ступінь відкриття, що генерується регулятором. Синя лінія (PV) відображає поточне значення температури води у системі, яка є регульованою змінною. Зелена лінія (SP) вказує на задане значення температури, яку потрібно підтримувати.



Рис. 5.3. Результати, отримані з урахуванням математичної моделі реального об'єкта

Видно, що до початку процесу налаштування (область "ДО" на графіці) система могла демонструвати значні коливання температури води (PV) і, можливо, неефективне керування клапаном (OP). Після застосування розрахованих параметрів ПІД-регулятора (область "ПІСЛЯ"), спостерігається суттєве покращення динаміки. Температура води (PV) швидко та стабільно виходить на задане значення (SP) з мінімальними відхиленнями та без значних коливань, що свідчить про ефективну роботу регулятора. Керуючий вплив (OP) на клапан стає більш згладженим і цілеспрямованим, забезпечуючи точну підтримку температури. Досягнуті результати підтверджують успішність параметричної ідентифікації та подальшого налаштування ПІД-регулятора, що критично важливо для забезпечення стабільної та енергоефективної роботи водонагрівальної установки.

Висновки до розділу 5

У цьому розділі була розроблена та інтегрована система управління MD PID (Модельно-орієнтоване PID-регулювання), в якій параметри регулятора розраховувалися аналітично на основі раніше ідентифікованої математичної моделі об'єкта, що забезпечило вищу точність і адаптивність порівняно з емпіричним налаштуванням. Ключовим етапом стала інтеграція моделі, створеної в середовищі MATLAB/Simulink, з реальною промисловою системою Honeywell Experion PKS за допомогою протоколу OPC (Open Platform Communications), що дозволило здійснювати двонаправлений обмін даними в реальному часі. Ця інтеграція сформуvala концепцію "цифрового двійника" водонагрівальної установки. На основі цих моделей було реалізовано каскадну структуру управління в Honeywell PKS, а результати налаштування підтвердили успішність підходу: система управління продемонструвала швидке і стабільне досягнення заданої температури води з мінімальним перерегулюванням.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведене дослідження було присвячене розробці та синтезу ефективної каскадної системи автоматичного керування (САК) температурою води на виході водогрійної котельної установки.

На етапі моделювання було успішно застосовано метод параметричної ідентифікації, який базувався на мінімізації похибки між експериментально отриманими перехідними характеристиками об'єкта та відгуком моделі. Цей підхід, реалізований у середовищі MATLAB System Identification Toolbox, дозволив отримати дві ключові передатні функції.

Модель теплообмінника, що описує повільну динаміку нагріву води, була ідентифікована як передатна функція другого порядку. Модель регулюючого клапана, що відображає швидку динаміку подачі пари, була ідентифікована як передатна функція першого порядку із запізненням. Обидві ідентифіковані моделі були піддані ретельній валідації шляхом порівняння їхніх змодельованих перехідних процесів з експериментальними даними, що підтвердило їхню високу адекватність і придатність для інженерних розрахунків.

Спираючись на точні математичні моделі, у було здійснено синтез каскадної системи автоматичного керування. Вибір каскадної структури був обґрунтований значною різницею в часових константах між повільним процесом нагріву води та швидким процесом регулювання потоку пари. Було розроблено двоконтурну САК: внутрішній контур відповідає за швидке керування клапаном та стабілізацію подачі пари, а зовнішній контур забезпечує точне підтримання заданої температури води.

Результати чисельного моделювання каскадної САК продемонстрували її значну перевагу над вихідною одноконтурною системою. Зокрема, каскадний підхід дозволив суттєво знизити перерегулювання та скоротити час встановлення, забезпечуючи швидкий, стійкий та точний відгук системи на зміну уставки, що є критично важливим для енергоефективності та надійності промислової котельної установки. Таким чином, основна мета роботи була досягнута: розроблено та валідовано точні математичні моделі об'єкта керування, на основі яких спроектовано ефективну каскадну систему автоматичного регулювання температури, що володіє значно покращеними динамічними показниками порівняно з базовою структурою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляєв В. О., Кравченко О. В. Автоматизація теплотехнічних процесів і установок : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 312 с.
2. Долінський А. А., Басок Б. І. Енергоефективні системи теплопостачання. Теорія і практика : монографія. – Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України, 2018. – 376 с.
3. Соколовський Я. І., Мазур В. В. Котельні установки та парогенератори: навч. посіб. – Львів : Львівська політехніка, 2020. – 284 с.
4. Плахотнюк І. М. Теплообмінні апарати : навч. посіб. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 256 с.
5. Штефанюк В. Л., Ковальчук О. П. Автоматизовані системи керування технологічними процесами : підручник. – Київ : Ліра-К, 2021. – 428 с.
6. Мороз О. В. Основи автоматичного керування теплотехнічними об'єктами: навч. посіб. – Дніпро : НМетАУ, 2018. – 238 с.
7. Кіпніс М. Я., Баран І. Я. Регулювання температури в системах теплопостачання : монографія. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. – 210 с.
8. Кузьменко Ю. М., Романюк В. С. Промислова автоматизація та контролери: навч. посіб. – Київ : НТУУ «КПІ», 2020. – 296 с.
9. Гайдук А. Р., Крутько П. Д. (укр. переклад) Теорія автоматичного керування. Том 2 : навч. посіб. – Київ : Вища школа, 2016. – 415 с.
10. Савченко В. А. Системи автоматичного регулювання теплових процесів: навч. посіб. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. – 262 с.
11. Басок Б. І., Долінський А. А. Теплові процеси та установки промислової енергетики : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 344 с.