

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

БР.АКП-17.00.00.000 ПЗ

Група АКП-23-1К

**Віктор Кудибин**

**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

Кудибин Віктор Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.51

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

### РОЗРОБКА І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРУБЧАТОЇ ПЕЧІ

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

#### Нормоконтроль

доцент О.В. Кучмистенко  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

#### Рецензент

доцент Л.Я. Чигур  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

#### Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-1К В.А. Кудибин  
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

#### Науковий керівник

доцент І.І. Чигур  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

#### Допущено до захисту

#### Завідувач кафедри

доцент А.І. Лагойда  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри АКІТ**

«   »                      2025 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

**Кудибин Віктор Андрійович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка і моделювання системи автоматизації трубчатої печі

керівник роботи Чигур Ігор Іванович, доцент, к.т.н.

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 52/8

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали практик, технологічна схема, методичні матеріали, каталоги, стандарти, технічна література, інтернет ресурси.

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

1. Характеристика трубчатої печі як керованого об'єкта.
2. Аналіз архітектур систем керування промисловими печами.
3. Математичне моделювання та ідентифікація об'єкта керування.
4. Синтез та аналіз автоматичної системи керування.

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

- Лист 1 – Функціональна схема автоматизації - БР.АКП-17.00.00.000 01. Лист  
- Структурна схема взаємозв'язків - БР.АКП-17.00.00.000 02. Лист 3 –  
Визначення динамічних характеристик об'єкта - БР.АКП-17.00.00.000 03.  
Лист 4 – Структурні схеми для розрахунку регуляторів - БР.АКП-  
17.00.00.000 04. Лист 5 – Варіанти реалізації АСК - БР.АКП-17.00.00.000 05.  
Лист 6 – Порівняльний аналіз роботи АСК - БР.АКП-17.00.00.000 06 .

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Характеристика трубчатої печі як керованого об'єкта	13.05.2025	
2.	Аналіз архітектур систем керування промисловими печами	17.05.2025	
3.	Математичне моделювання та ідентифікація об'єкта керування	25.05.2025	
4.	Синтез та аналіз автоматичної системи керування	08.06.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

В.А. Кудибин \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

І.І. Чигур \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 49 сторінок друкованого тексту, 19 рисунків, 3 таблиць, 10 посилань на джерела.

Тема: «Розробка і моделювання системи автоматизації трубчатої печі».

Об'єкт дослідження: процес нагрівання теплоносія в трубчатій печі.

Мета роботи: підвищення ефективності та безпеки роботи печі шляхом впровадження сучасних засобів автоматичного керування.

У процесі виконання роботи було використано комплекс наукових та інженерних методів, що забезпечили ґрунтовне вивчення об'єкта дослідження та розробку ефективної системи автоматизації трубчатої печі. Системний аналіз – для визначення основних параметрів та структури об'єкта керування, а також формалізації вимог до системи автоматизації. Математичне моделювання – для побудови моделі динаміки трубчатої печі та процесів тепломасообміну, що відбуваються в ній. Імітаційне моделювання – із використанням спеціалізованих програмних засобів (наприклад, MATLAB/Simulink), що дозволило дослідити поведінку системи керування в різних режимах роботи. Методи автоматичного керування – застосовувалися для синтезу регуляторів, налаштування ПІД-контролерів, а також розробки алгоритмів стабілізації температури та оптимізації теплового навантаження.

Результати бакалаврської роботи: У рамках дослідження проаналізовано технологічні особливості роботи трубчатої печі, обґрунтовано вибір структури системи автоматизації, розроблено її математичну модель та проведено комп'ютерне моделювання процесу керування. Результати моделювання підтвердили ефективність обраних рішень і дозволили сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження системи в реальних умовах. Робота має значне практичне значення та може бути використана при модернізації теплотехнічного обладнання підприємств.

Ключові слова: піч, керування, теплоносій, модель, регулятор.

## ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 49 pages of printed text, 19 figures, 3 tables, 10 references to sources.

Topic: "Development and modeling of a tube furnace automation system".

Object of research: the process of heating the coolant in a tube furnace.

Work goal: to increase the efficiency and safety of the furnace operation by introducing modern automatic control tools.

In the process of performing the work, a complex of scientific and engineering methods was used, which ensured a thorough study of the object of research and the development of an effective tube furnace automation system. System analysis - to determine the main parameters and structure of the control object, as well as formalize the requirements for the automation system. Mathematical modeling - to build a model of the dynamics of the tube furnace and the heat and mass transfer processes occurring in it. Simulation modeling - using specialized software tools (for example, MATLAB/Simulink), which allowed us to study the behavior of the control system in different operating modes. Automatic control methods – were used for the synthesis of regulators, tuning of PID controllers, as well as the development of algorithms for temperature stabilization and thermal load optimization.

Results of the bachelor's thesis: As part of the study, the technological features of the tube furnace operation were analyzed, the choice of the structure of the automation system was justified, its mathematical model was developed, and computer modeling of the control process was conducted. The modeling results confirmed the effectiveness of the selected solutions and allowed us to formulate practical recommendations for the implementation of the system in real conditions. The work has significant practical significance and can be used in the modernization of heat engineering equipment of enterprises.

Keywords: furnace, control, coolant, model, regulator.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>8</b>
<b>1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТРУБЧАТОЇ ПЕЧІ ЯК КЕРОВАНОГО ОБ'ЄКТА.....</b>	<b>11</b>
1.1 Детальний опис призначення, будови та принципів роботи печі.....	11
1.2 Аналіз механізмів теплопередачі (випромінювання, конвекція) у печі.....	14
1.3 Властивості палива і теплоносія.....	14
1.4 Експлуатаційні параметри та управління безпекою.....	18
Висновки до розділу .....	19
<b>2 АНАЛІЗ АРХІТЕКТУР СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИМИ ПЕЧАМИ.....</b>	<b>20</b>
2.1 Внутрішні виклики в керуванні трубчастими печами.....	20
2.2 Оцінка одноконтурних автоматичних систем керування (АСК).....	21
2.3 Переваги каскадних систем керування.....	24
2.4 Розширені та ієрархічні стратегії керування.....	26
Висновки до розділу .....	27
<b>3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....</b>	<b>28</b>
3.1 Вхідні та вихідні параметри для моделювання.....	28
3.2 Рівняння теплового балансу та структурна схема.....	29
3.3 Експериментальне дослідження динамічних характеристик .....	30
3.4 Експериментальне визначення динамічних характеристик КО за допомогою детермінованих збурюючих впливів .....	32

					БР.АКП-17.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка і моделювання системи автоматизації трубчатої печі	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Кудибин В.А.						
Перевір.		Чигур І.І.					6	61
Реценз.		Чигур Л.Я.				АКП-23-1К ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О						
Затверд.		Лагойда А.І.						

Висновки до розділу .....	35
<b>4 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ...</b>	<b>36</b>
4.1 Розрахунок та аналіз одноконтурної АСК температури теплоносія.....	36
4.2 Розрахунок та аналіз одноконтурної АСК температури димових газів.....	38
4.3 Каскадна АСК температури. Оптимізація та порівняльний аналіз.....	40
4.4 Удосконалення системи подачі повітря.....	44
4.5 Рекомендації щодо вдосконалення систем керування трубчатими печами.	45
Висновки до розділу .....	45
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>47</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....</b>	<b>49</b>

					БР.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## ВСТУП

Метою бакалаврської роботи є створення системи автоматичного керування трубчатою піччю.

Якість кінцевої продукції та загальні техніко-економічні показники промислових установок значною мірою залежать від підтримання точних теплових та технологічних режимів у трубчатих печах. Відхилення від заданих параметрів можуть призвести до виробництва некондиційної продукції, збільшення споживання енергії та виникнення небезпечних ситуацій. Температурний режим трубчатих печей є одним з ключових індикаторів їх ефективності.

Взаємозв'язок між процесами, де продуктивність печі безпосередньо впливає на ефективність наступних установок (наприклад, регенерації діетиленгліколю (ДЕГУ)), підкреслює важливість надійного керування, що виходить за межі простої експлуатації печі. Збільшення або зменшення температури нагрітого теплоносія безпосередньо впливає на якість регенерації ДЕГУ, причому вища температура холодного теплоносія призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД). Цей ланцюг подій демонструє, що піч не є ізольованим агрегатом, а критичним вузлом у більшому, взаємозалежному процесі. Проблеми керування в одній частині можуть каскадно поширюватися, впливаючи на вихід та економічну життєздатність усієї виробничої лінії. Це підкреслює необхідність інтегрованих, а не розрізнених, стратегій керування.

Автоматизація трубчастих печей є критично важливим аспектом сучасних промислових процесів, що забезпечує не лише підвищення ефективності та безпеки, а й оптимізацію споживання енергії та мінімізацію впливу на довкілля. Трубчасті печі, які широко використовуються в нафтопереробній, хімічній, металургійній та інших галузях промисловості, є серцем багатьох технологічних ланцюгів, де їхня стабільна та ефективна робота безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту та загальну економіку виробництва. Впровадження автоматизованих систем дозволяє не тільки досягти точного контролю за

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурними режимами, тиском та потоками, але й оперативно реагувати на будь-які відхилення, запобігаючи аварійним ситуаціям та оптимізуючи продуктивність. Цей вступ закладає основу для розуміння важливості та багатогранності автоматизації трубчастих печей у сучасному промисловому ландшафті.

Незважаючи на їхню критичну роль, рівень автоматизації трубчастих печей часто відстає від інших промислових апаратів. Це пояснюється їхньою складною теплохімічною динамікою, значними притаманними запізненнями та труднощами точного вимірювання ключових параметрів процесу в реальному часі. До причин цього відставання відносять недостатнє вивчення технологічних та теплохімічних особливостей трубчастих печей як складних теплових об'єктів керування, відсутність адекватних математичних моделей та алгоритмів керування для різних типів печей, а також брак методів та пристроїв для безперервного вимірювання основних якісних параметрів.

Виявлена відсутність математичних моделей та алгоритмів керування, а також недостатнє вивчення вказують на фундаментальний пробіл у знаннях щодо ефективного керування цими складними системами. Це не просто інженерна проблема; це наукова проблема, яка вимагає дослідницького підходу для подолання розриву між теоретичним розумінням та практичним застосуванням. Це дослідження безпосередньо спрямоване на усунення цих прогалин шляхом розробки математичних моделей, експериментальної характеристики та вдосконалених алгоритмів керування, що позиціонує його як фундаментальний внесок у галузь.

Основна проблема полягає в нездатності існуючих одноконтурних систем керування адекватно справлятися зі значними часовими запізненнями та збуреннями, притаманними роботі трубчастих печей. Це призводить до субоптимальної продуктивності, втрат енергії та погіршення якості продукції.

Запропоноване рішення включає розробку та впровадження вдосконаленої системи автоматичного керування, зокрема, каскадної архітектури керування, для досягнення точного, стабільного та енергоефективного нагрівання теплоносія.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою роботи є розробка ефективної системи автоматичного керування нагріванням теплоносія в трубчатій печі, яка забезпечить оптимізацію енергоспоживання, підвищення якості продукції та поліпшення безпеки виробництва.

Явне згадування "безпеки виробничого процесу" як однієї з цілей, поряд з ефективністю та якістю, вказує на те, що поточні недоліки керування створюють не лише економічні, а й операційні ризики. Запропоноване рішення є багатограним покращенням, що стосується як продуктивності, так і безпеки. Безпека є критичним, невід'ємним аспектом у промислових операціях, особливо з високотемпературними процесами, що включають легкозаймисті матеріали. Це підвищує значимість дослідження з суто економічної чи якісної сфери до сфери зі значними наслідками для зниження ризиків, роблячи вдосконалену систему керування необхідною, а не просто оптимізацією.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ТРУБЧАТОЇ ПЕЧІ ЯК КЕРОВАНОГО ОБ'ЄКТА

## 1.1 Детальний опис призначення, будови та принципів роботи печі

Трубчасті печі є невід'ємним елементом у нафтопереробній, нафтохімічній та газопереробній промисловості, виконуючи функцію ключових теплообмінних апаратів. Їхнє основне призначення полягає у передачі необхідної кількості теплоти технологічним рідинам для забезпечення різноманітних фізичних та хімічних перетворень. Спектр їх застосування надзвичайно широкий, охоплюючи такі процеси, як перегонка сирової нафти для розділення її на фракції (наприклад, бензин, гас, дизельне паливо). Вони також використовуються у піролізі – високотемпературному термічному розкладанні вуглеводнів, наприклад, для виробництва етилену, де печі функціонують як трубчасті піролізні реактори з чітко розділеними радіаційною та конвекційною секціями. Крім того, трубчасті печі є критично важливими для процесів риформінгу та гідроочищення, які вимагають точного контролю температури для хімічних реакцій з метою покращення якості вуглеводневих потоків. У контексті підготовки газу, як зазначено у вихідному документі, вони відіграють вирішальну роль у нагріванні теплоносіїв, таких як паливо Т-1, що, своєю чергою, використовується для регенерації діетиленгліколю (ДЕГ) – ключового компонента у процесі осушки природного газу.

Класифікація трубчастих печей ґрунтується на кількох визначальних характеристиках. За технологічним призначенням їх поділяють на нагрівальні (для попереднього підігріву сировини) та нагрівально-реакційні (де нагрів та хімічні реакції відбуваються одночасно, наприклад, у процесах крекінгу або піролізу). З точки зору механізмів теплопередачі, печі можуть бути конвекційними, радіаційними або комбінованими конвекційно-радіаційними. У факельних трубчастих печах, що є поширеним типом, радіація зазвичай відповідає за 70-80% поглинання тепла, тоді як конвекція становить 20-30%. Конструктивні конфігурації також відрізняються: існують вертикальні циліндричні печі, часто використовувані для нагріву одного потоку, що мають

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

центральну камеру згоряння та оточуючі радіантні труби, а також конвекційну секцію, розташовану вище. Коробчасті (камерні) печі, що мають прямокутну форму, дозволяють розміщувати кілька радіантних стінок та пальників. Для великих теплових потужностей або нагріву кількох потоків до різних температур застосовуються багатокамерні конструкції. Додаткові класифікації включають форму (ширококамерні, вузькокамерні, кільцеві), відносне розташування осей факела та труб (паралельне, перпендикулярне) та розташування труб (вертикальне, горизонтальне, гвинтове).

Вибір конкретної конструкції печі тісно пов'язаний з її функціональним призначенням. Наприклад, піч для піролізу, яка вимагає точного контролю реакцій, матиме чітко розділені радіаційну та конвекційну зони для оптимізації теплових навантажень. Ця взаємозалежність між призначенням печі та складністю її конструкції є фундаментальною. Вимоги до процесу, такі як необхідність високотемпературних хімічних реакцій проти простого нагріву, безпосередньо визначають структурну складність та оптимізацію теплопередачі у конструкції печі. Це, своєю чергою, означає, що вибір стратегії керування також має бути адаптований до конкретної конструкції печі та її основної функції. Піч, призначена для точного контролю реакцій, вимагатиме більш складного та чутливого керування, ніж простий підігрівач, навіть якщо обидва апарати є трубчастими печами.

У даному дослідженні розглядається вертикальна циліндрична піч ЦС-1, призначена для нагрівання теплоносія Т-1 від 200°C до 250°C в установці осушки природного газу (рисунок 1.1). Піч складається з основних частин: камери радіації, камери конвекції, пристроїв для спалювання палива та пристроїв для створення тяги (димова труба, димососи). Холодний теплоносій надходить у піч з температурою 200°C, послідовно проходить змішувачі камери конвекції, а потім камери радіації. Такий протитечійний рух теплоносія та продуктів згоряння палива забезпечує максимальне використання теплоти горіння. На виході з печі теплоносій має температуру 250°C.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

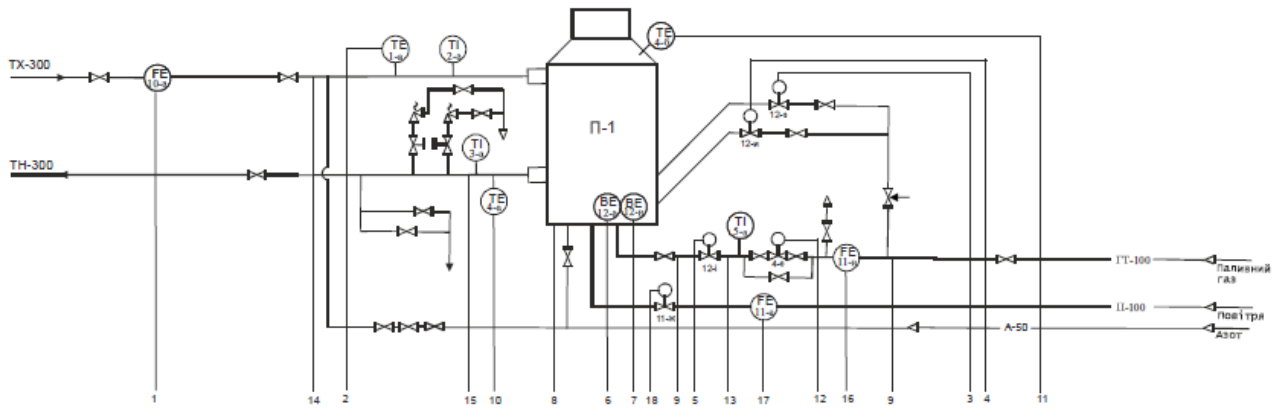


Рисунок 1.1 – Функціональна схема автоматизації трубчатої печі

Конструктивні розміри печі ЦС-1 включають: внутрішній діаметр кожуха – 5,6 м; робоча довжина радіаційних труб – 10,0 м; ефективний об'єм паливної камери – 0,021084 м<sup>3</sup>; крок розміщення труб – 0,4 м; зовнішній діаметр труб у радіаційній камері – 0,219 м; зовнішній діаметр труб у конвекційній камері – 0,108 м; висота димової труби – 12,0 м. Задана теплова потужність печі становить 10 000 000 ккал/год, а ККД печі – 0,8.

Конкретні проектні параметри (наприклад, внутрішній діаметр, довжина труб, об'єм камер), наведені у , є не просто описовими, а фундаментальними для динамічної поведінки печі. Ці фізичні обмеження безпосередньо впливають на швидкість теплопередачі, час перебування рідини та, зрештою, на часові константи та запізнення, що спостерігаються в системі, які система керування повинна явно враховувати. Більші об'єми та довші шляхи потоку неминуче призводять до більшої теплової інерції та довших транспортних запізнь. Проектування системи керування (наприклад, вибір ПІ- чи ПІД-регулятора, каскадної структури) безпосередньо залежить від цих фізичних характеристик, оскільки вона повинна компенсувати ці притаманні динамічні обмеження.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ

Арк.

13

## 1.2 Аналіз механізмів теплопередачі (випромінювання, конвекція) у печі

У трубчатих печах відбувається складний процес теплопередачі від гарячих газів до рідини, що протікає по трубах, причому задіяні всі три способи теплопередачі. У факельних трубчатих печах речовина, що нагрівається, поглинає 70-80% тепла за рахунок радіації та 20-30% за рахунок конвекції. У камері радіації передача тепла здійснюється переважно за рахунок випромінювання від факела, розпечених стінок печі та триатомних і двоатомних газів (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>). У камері конвекції теплопередача відбувається здебільшого за рахунок конвекції (60-70% від загальної кількості тепла), а також випромінювання триатомних газів та стінок печі.

Диференційне домінування радіації та конвекції в різних зонах печі означає, що піч не є однорідною тепловою системою. Ця неоднорідність вимагає стратегії керування, яка може враховувати різні часи відгуку та чутливості в різних секціях процесу нагрівання, потенційно впливаючи на розміщення датчиків та міркування щодо багатозонного керування. Радіація, як правило, є швидшим, більш прямим способом теплопередачі, що сильно залежить від різниці температур у четвертому ступені. Конвекція повільніша, включає потік рідини. Це означає, що різні секції печі реагуватимуть на зміни подачі палива з різною швидкістю та величиною. Комплексна стратегія керування повинна визнавати цю просторову та часову неоднорідність, що потенційно призводить до необхідності розподіленого зондування або навіть багатоканального керування (МІМО), якщо різні зони керуються незалежно.

## 1.3 Властивості палива і теплоносія

У даному контексті, паливо Т-1 (паливо для реактивних двигунів) виступає в ролі теплоносія, що нагрівається в трубчастій печі. Його фізико-хімічні властивості є критично важливими для ефективної та безпечної експлуатації (таблиця 1.1).

Щільність палива Т-1 при 20°C становить 780-810 кг/м<sup>3</sup>. Фракційний склад

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

характеризується температурою початку перегонки не вище 150°C, при цьому 10% відганяється при температурі не вище 175°C, 50% – не вище 225°C, 90% – не вище 270°C, а 98% – не вище 280°C.

Таблиця 1.1 – Фізико-хамічні показники палива Т-1

ПОКАЗНИК	ЗНАЧЕННЯ
Щільність при 20°C	780-810 кг/м <sup>3</sup>
Температура початку перегонки	≤ 150°C
10% відганяється при температурі	≤ 175°C
50% відганяється при температурі	≤ 225°C
90% відганяється при температурі	≤ 270°C
98% відганяється при температурі	≤ 280°C
Кінематична в'язкість при 20°C	≥ 1.30 мм <sup>2</sup> /с
Температура спалаху (мін.)	28°C
Температура самозаймання (мін.)	220°C (для TS-1), 380°C (для реактивного палива)
Питома теплота згоряння (мін.)	43.12 МДж/кг (для TS-1)
Вміст сірки	≤ 0.03% мас.
Вміст ароматичних вуглеводнів	≤ 20% мас.

Кінематична в'язкість при 20°C повинна бути не менше 1,30 мм<sup>2</sup>/с. Температура спалаху Т-1 складає мінімум 28°C, а температура самозаймання для реактивного палива загалом становить близько 380°C, для TS-1 - не нижче 220°C. Питома теплота згоряння для TS-1 становить не менше 43,12 МДж/кг або 42903 кДж/кг. Ці характеристики є фундаментальними для розрахунку тепловиділення та забезпечення безпечного поведіння з паливом. Термічна стабільність палива Т-1 має першочергове значення: перегрів може призвести до термічної деградації, утворення коксу на нагрівальних поверхнях, що знижує ефективність теплопередачі та вимагає очищення або заміни обладнання. Температура спалаху та самозаймання визначають межі безпечної експлуатації, впливаючи на мінімальні робочі температури та процедури аварійного відключення.

Природний газ є основним паливом для трубчастої печі. Його хімічний склад, що переважно складається з метану (98,51%) з невеликими домішками етану, пропану, бутану, CO<sub>2</sub> та N<sub>2</sub>, безпосередньо впливає на температуру горіння, яка може перевищувати 2000 К, та на властивості полум'я. Підтримання

правильного співвідношення повітря до палива має вирішальне значення для повного згоряння та ефективності процесу. З точки зору безпеки, природний газ є легкозаймистим і утворює вибухонебезпечні суміші з повітрям у певних концентраційних межах (нижня вибухонебезпечна межа для метану становить 5%, верхня – 15%). Він також становить ризик токсичності через асфіксію (чистий метан/етан) та наявність високотоксичних компонентів, таких як сірководень. Отже, належна вентиляція та системи виявлення витоків є обов'язковими.

Метою роботи печі є нагрівання палива Т-1, яке, своєю чергою, використовується для нагріву діетиленгліколю (ДЕГ) для його регенерації. ДЕГ є абсорбентом для водяної пари у процесі осушки природного газу. Його регенерація передбачає нагрівання насиченого розчину ДЕГ у десорбері для випаровування абсорбованої води. Якість регенерації ДЕГ безпосередньо впливає на ефективність осушки газу.

Окрім Т-1, у промисловості використовуються й інші теплоносії. Водяна пара є поширеним промисловим теплоносієм завдяки високій здатності до накопичення тепла та високим коефіцієнтам тепловіддачі, особливо її прихованій теплоті конденсації (2260 кДж/кг при атмосферному тиску). Однак, її тиск значно зростає зі збільшенням температури. Мінеральні оливи (термомасла) застосовуються для нагріву до 250-300°C; вони характеризуються високими температурами кипіння та відносно низькою вартістю. Проте, вони можуть утворювати коксові відкладення, що знижує теплопередачу. Ці теплоносії вимагають розширювальних ємностей та інертного газового середовища через розширення об'єму та окислення. Синтетичні (неорганічні) термомасла забезпечують ще вищі робочі температури (до 350-400°C).

Властивості палива та теплоносія є визначальними для безпечної та ефективної роботи печі. Властивості палива та теплоносія, такі як температура спалаху, температура самозаймання, термічна стабільність та хімічний склад, безпосередньо визначають межі безпечної експлуатації та ефективність згоряння. Наприклад, деградація теплоносія Т-1 через надмірні температури може призвести до утворення коксу, що не тільки знижує ефективність теплопередачі,

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

але й вимагає дорогого обслуговування. Це підкреслює, що проектування системи керування не може обмежуватися лише досягненням заданих значень; воно повинно інтегрувати надійні системи безпеки та враховувати довгострокову цілісність теплообмінного середовища. Це, своєю чергою, вказує на необхідність розширених діагностичних можливостей у системі автоматичного керування (АСК) для виявлення ранніх ознак деградації або небезпечних умов.

Детальні хімічні та фізичні властивості палива та теплоносія є критично важливими не лише для їхньої характеристики, а й для безпосереднього впливу на ефективність згоряння, швидкість виділення тепла та параметри безпеки. Наприклад, "Границі вибуховості" не просто є даними, а визначають безпечний робочий діапазон, який система керування повинна суворо підтримувати для запобігання катастрофічним відмовам. Хімічний склад визначає стехіометричну потребу в повітрі та теплоту згоряння. Фізичні властивості, особливо межі вибуховості та температура спалаху, визначають межі безпеки. Система керування повинна не тільки оптимізувати ефективність, але й працювати суворо в межах цих параметрів безпеки.

Елементний склад палива в масових відсотках, отриманий шляхом перерахунку з об'ємних відсотків, представлений у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Перерахунок складу палива з об'ємних відсотків в масові

КОМПОНЕНТИ	МОЛЕКУЛЯРНА МАСА КГ/МОЛЬ	МОЛЬНА (ОБ'ЄМНА) ЧАСТКА, RI	MIRI	МАСОВИЙ СКЛАД, %
CH <sub>4</sub>	16	0.9851	15.761	97.12
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30	0.0048	0.144	0.89
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44	0.0014	0.061	0.37
ізо-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58	0.0002	0.011	0.06
н-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58	0.0003	0.017	0.1
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72	0.0001	0.007	0.04
CO <sub>2</sub>	44	0.0002	0.009	0.05
N <sub>2</sub>	28	0.0078	0.218	1.34
Сума	-	1.000	-	100.00

Ця таблиця є результатом розрахунків з вихідного складу газу та є

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

важливою для аналізу згоряння. Масовий склад безпосередньо використовується для визначення теоретичної та фактичної потреби в повітрі для повного згоряння, що забезпечує оптимальне використання палива та мінімізацію викидів.

#### 1.4 Експлуатаційні параметри та управління безпекою

Основною метою керування трубчастою піччю є підтримання температури теплоносія на виході на рівні 250°C. Досягнення цієї мети вимагає точного контролю кількох критичних параметрів. До температурних параметрів належать температура сировини на вході в змійовик печі (ТХ)  $200 \pm 10$  °C та температура сировини на виході із змійовика печі (ТН)  $250 \pm 10$  °C, яка є головною регульованою величиною. Температура димових газів на виході з зони конвекції, що становить 290 °C, є важливим проміжним показником, що відображає ефективність згоряння та потенційний перегрів.

Тискові параметри включають тиск нагрітого теплоносія (ТН) на виході з печі в діапазоні 0,3-0,7 МПа та тиск паливного газу 0,3 МПа. Витратні параметри охоплюють витрату холодного теплоносія (ТХ) на вході в піч 218,75 м<sup>3</sup>/год та витрату палива 1418 м<sup>3</sup>/год. Крім того, підтримання певного співвідношення між витратою паливного газу та повітря є ключовим для повного згоряння та ефективності.

Управління безпекою є невід'ємною частиною експлуатації печей. У випадку перевищення температури димових газів допустимих меж, система автоматично подає азот (через трубопроводи А-50) до печі, а засувки припиняють подачу холодного теплоносія та палива, що є критичним захисним блокуванням. Загальні протоколи безпеки включають постійний нагляд за піччю, заборону використання легкозаймистих рідин для розпалювання, контроль обсягу пального, регулярний огляд та очищення димоходів від тріщин та сажі, підтримання безпечної відстані від горючих матеріалів, закриття дверцят топки під час горіння, забезпечення належної вентиляції для запобігання накопиченню чадного газу та уникнення сушіння одягу на печі.

Відхилення контрольних параметрів мають багатоаспектний вплив на

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

економічну ефективність та безпеку. Збільшення або зменшення температури нагрітого теплоносія безпосередньо впливає на якість регенерації ДЕГ, а підвищення температури холодного теплоносія призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД). Підвищення температури димових газів може спричинити перегрів печі. Дослідження показують, що динамічні показники якості регулювання, такі як перерегулювання та час перехідного процесу, безпосередньо впливають на якість продукції, енергоспоживання та безпеку експлуатації. Це означає, що досягнення оптимального керування полягає не лише у досягненні заданого значення, а й у мінімізації тимчасових відхилень (перерегулювання, час встановлення) для запобігання виробництву некондиційної продукції, зменшення втрат енергії та уникнення небезпечних умов. Це підкреслює важливість динамічних показників продуктивності, які стають прямими індикаторами економічних показників та показників безпеки.

### **Висновки до розділу**

В цьому розділі детально розглянуто та проаналізовано технологічний процес підігріву теплоносія в трубчатій печі. Цей процес є критично важливим для регенерації діетиленгліколю (ДЕГ) в установках регенерації. Ефективний підігрів теплоносія забезпечує оптимальні умови для випаровування води та інших домішок з ДЕГ, що є ключовим для його повторного використання в процесах осушення газу.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

## 2 АНАЛІЗ АРХІТЕКТУР СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИМИ ПЕЧАМИ

### 2.1 Внутрішні виклики в керуванні трубчастими печами

Керування трубчастими печами є складним завданням через їхні динамічні характеристики, які створюють значні виклики для систем автоматизації. Ці об'єкти характеризуються наявністю значних часових затримок (мертвого часу). Передача тепла від полум'я до технологічної рідини через стінки труб та по всій довжині змійовиків призводить до істотних затримок. Вихідний документ прямо вказує на "великий час запізнення по каналу 'витрата палива – температура теплоносія на виході', що становить приблизно 300 с". Ця затримка ускладнює точне керування, оскільки керуючі дії проявляють свій повний ефект лише через значний проміжок часу, що може призвести до коливань або великих відхилень від заданих значень.

Крім того, процеси в печах є нелінійними. Горіння, коефіцієнти теплопередачі та властивості рідин змінюються нелінійно залежно від температури та витрати, що робить лінійні моделі керування лише наближеними. Трубчасті печі також є багатовимірними об'єктами, де численні вхідні змінні (витрата палива, витрата повітря, вхідна температура, витрата продукту) впливають на численні вихідні змінні (температура продукту на виході, температура димових газів), часто з перехресними зв'язками, що ускладнює незалежне керування. Керований параметр (температура на виході) піддається різноманітним збуренням, таким як коливання якості палива, температури теплоносія на вході та його витрати. Ці збурення, особливо ті, що діють на внутрішні контури, можуть викликати значні відхилення зі значною затримкою.

Неефективне керування має прямі економічні наслідки та впливає на якість продукції. Відхилення від цільової температури на виході безпосередньо впливають на якість регенованого ДЕГ, що, своєю чергою, позначається на ефективності осушки природного газу. Перерегулювання або тривалий час перехідних процесів можуть призвести до виробництва некондиційної продукції.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

З економічної точки зору, неефективне згоряння (через неправильне співвідношення повітря-паливо) або неоптимальні температурні профілі призводять до збільшення споживання паливного газу та зниження ККД печі. З точки зору безпеки, високі температури димових газів можуть спричинити перегрів та пошкодження печі. Неконтрольоване згоряння або температурні відхилення становлять значні ризики безпеці.

Висока інерція та вплив збурень призводять до "прихованих витрат". Тривалі часові затримки означають, що просте зворотне керування, засноване на відхиленні, буде мати труднощі зі швидкою компенсацією збурень, що призведе до тривалих періодів субоптимальної роботи. Це обґрунтовує інвестиції у більш досконалі стратегії керування, оскільки вигоди виходять за рамки простої стабільності процесу, забезпечуючи прямі економічні та безпекові покращення. Це також вказує на те, що показники продуктивності, такі як перерегулювання та час встановлення, повинні бути безпосередньо пов'язані з ключовими показниками економічної ефективності та безпеки для цілісної оцінки.

## **2.2 Оцінка одноконтурних автоматичних систем керування (АСК)**

В одноконтурній автоматичній системі керування (АСК) один регулятор безпосередньо маніпулює однією керуючою змінною (наприклад, витратою палива) для підтримання однієї керованої змінної (наприклад, температури на виході) на заданому значенні. Типові реалізації включають існуючу систему, яка використовує одноконтурне керування температурою теплоносія шляхом зміни витрати палива, з окремим регулятором для співвідношення повітря-паливо. Інший варіант передбачає регулювання температури димових газів над передавальною стінкою.

Одноконтурні системи мають певні переваги. Вони простіші у проектуванні, впровадженні та обслуговуванні. Менша кількість компонентів зазвичай призводить до вищої надійності та нижчої вартості встановлення (рисунок 2.1, 2.2).

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

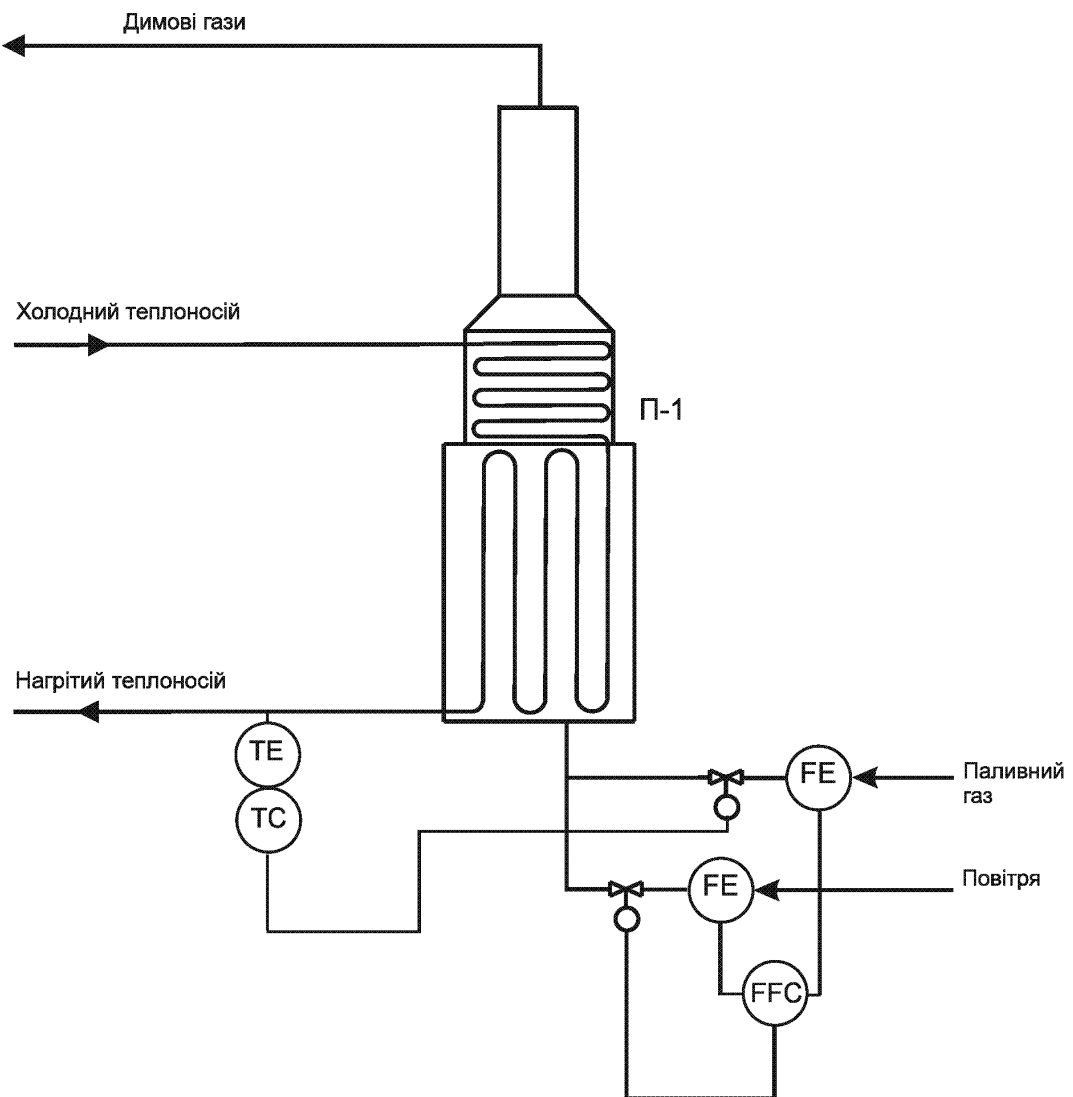


Рисунок 2.1 - Одноконтурна АСК температури теплоносія на виході з печі

Однак, ці системи мають критичні обмеження. Їхній головний недолік полягає у низькій ефективності компенсації збурень, особливо тих, що діють на проміжні змінні або на сам керуючий елемент, доки ці збурення не вплинуть на основну керовану змінну. Наприклад, така система реагує лише тоді, коли збурення витрати палива змінює температуру димових газів. Через значну часову затримку (300 с для каналу "витрата палива – температура теплоносія на виході" в печі), одноконтурні системи демонструють великі динамічні похибки та тривалі перехідні процеси. Це ускладнює досягнення бажаної якості регулювання. Крім того, регулювання на основі температури на виході може призвести до

коливальної поведінки керованої змінної.

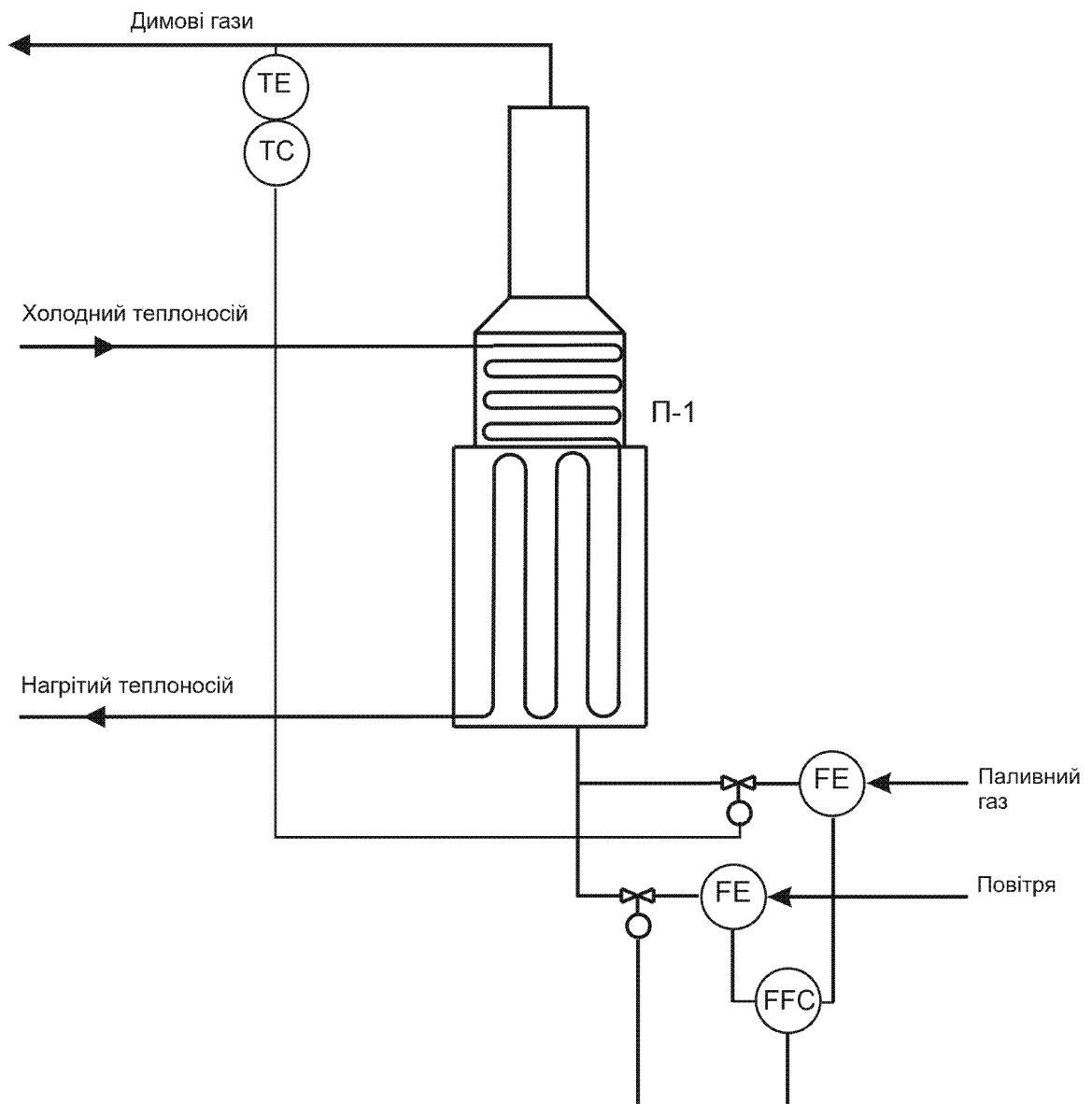


Рисунок 2.2 - Одноконтурна АСК температури димових газів

Існує фундаментальний компроміс в одноконтурному керуванні, який полягає у протиріччі між швидкодією регулятора та запасом стійкості системи. Це означає, що для процесів зі значною інерцією та затримками, де потрібна висока точність та швидке усунення збурень, одноконтурне керування є принципово обмеженим. Інженерам доводиться обирати між стабільністю та продуктивністю, що часто компрометує ефективність або безпеку в промислових застосуваннях.

### 2.3 Переваги каскадних систем керування

Каскадне керування є ефективним рішенням для подолання обмежень одноконтурних систем, особливо у процесах зі значними часовими затримками. Ця архітектура передбачає використання двох (або більше) контурів керування, де вихід основного (зовнішнього) регулятора слугує заданим значенням для допоміжного (внутрішнього) регулятора. Внутрішній контур, який керує швидшою, проміжною змінною (наприклад, температурою димових газів), допомагає швидко усувати збурення до того, як вони вплинуть на основну керовану змінну (наприклад, температуру теплоносія на виході).

Каскадні системи демонструють низку переваг. Вони значно покращують якість керування, компенсуючи збурення, що діють на внутрішній контур (наприклад, збурення витрати палива), перш ніж вони вплинуть на основну змінну процесу. Швидка реакція внутрішнього контуру (затримка 5 с для каналу "витрата палива – температура димових газів" порівняно з 300 с для основного каналу) дозволяє ефективно усувати збурення на ранній стадії. Це призводить до підвищення точності керування, підтримуючи керований параметр на заданому значенні з високою точністю, навіть за наявності великих затримок об'єкта. Каскадні системи також забезпечують швидшу перехідну реакцію на зміни заданого значення та збурення порівняно з одноконтурними системами, причому швидкість може зрости до 60 разів. Крім того, вони здатні компенсувати зміни коефіцієнта передачі внутрішньої частини об'єкта керування. Поєднання двох регуляторів у каскадній схемі призводить до меншої інерційності та запобігає великим перерегулюванням, забезпечуючи менші відхилення від заданого значення.

У трубчастих печах каскадна система регулює температуру димових газів (внутрішній контур) з корекцією за температурою теплоносія на виході (зовнішній контур). Це ефективно вирішує проблему значної часової затримки основного процесу, використовуючи швидшу та чутливішу проміжну змінну (рисунок 2.3).

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

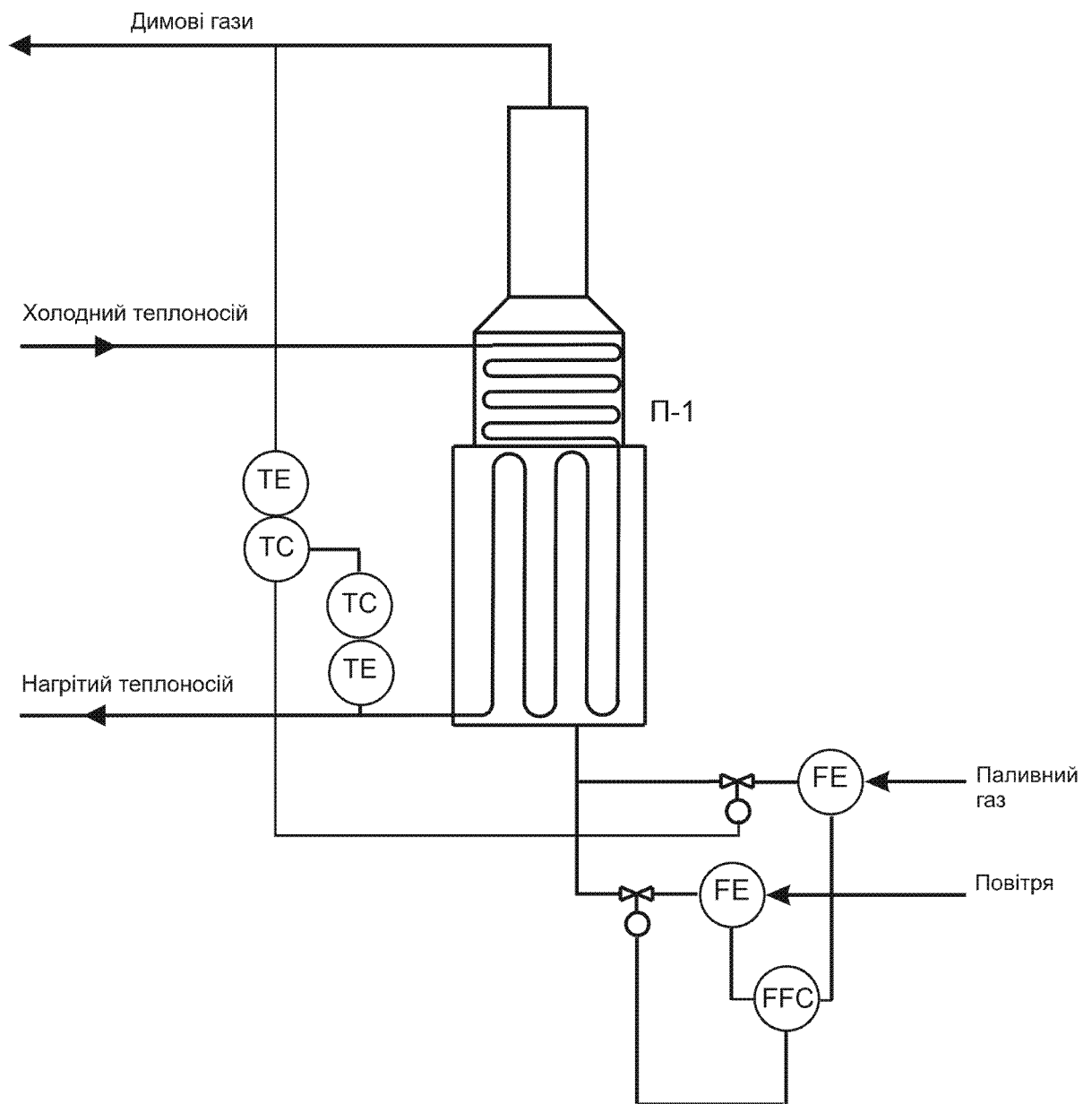


Рисунок 2.3 - Каскадна АСК температури теплоносія на виході печі

Кількісне підтвердження переваг каскадного керування є очевидним. Основна проблема полягає у 300-секундній затримці в основному контурі. Каскадне керування, використовуючи швидшу проміжну змінну (температуру димових газів із 5-секундною затримкою), дозволяє значно прискорити реакцію системи. Це є прямим застосуванням принципів теорії керування для подолання фізичного обмеження процесу. Швидший внутрішній контур діє як "попередній компенсатор" для збурень, які в іншому випадку зайняли б багато часу, щоб вплинути на основний вихід. Це демонструє, що ефективно проектування системи

керування часто передбачає виявлення та використання швидших, більш чутливих внутрішніх змінних процесу для покращення загальної динамічної продуктивності системи, а не лише покладається на пряме керування кінцевим результатом. Цей принцип широко застосовується у складних промислових процесах.

## 2.4 Розширені та ієрархічні стратегії керування

Хоча каскадне керування значно покращує продуктивність, для оптимізації складних та невизначених промислових процесів доступні ще більш досконалі стратегії.

Адаптивне керування – це системи, які автоматично коригують свої параметри у відповідь на зміни динаміки процесу або збурень. Це особливо корисно для печей, де якість палива або навантаження часто змінюються. Адаптивні системи можуть забезпечити економію енергії та покращення якості продукції.

Модельне предиктивне керування (MPC) використовує явну динамічну модель процесу для прогнозування майбутньої поведінки та оптимізації керуючих дій на горизонті прогнозування, дотримуючись обмежень. Цей метод широко застосовується в хімічній та енергетичній промисловості і може керувати локальними регуляторами типу ПД.

Керування на основі нечіткої логіки застосовує правила, засновані на знаннях експертів, для обробки неточних або невизначених даних, забезпечуючи гнучке керування у складних, нелінійних системах, де важко отримати точні математичні моделі. Воно дозволяє систематично застосовувати емпіричні знання.

Робастне керування зосереджується на розробці регуляторів, які підтримують високу продуктивність та стабільність, навіть коли модель керованого об'єкта є невизначеною або його параметри змінюються у широкому діапазоні. Метою є мінімальні зміни вихідного сигналу системи, незважаючи на невеликі варіації параметрів.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ці розширені стратегії часто інтегруються в багаторівневі ієрархічні системи керування, які поділяють функції керування на різні рівні, від нижчого (ПД-регулятори) до середнього (нечіткі регулятори) та вищого (експертні системи). Така архітектура дозволяє поєднувати точний локальний контроль з глобальною оптимізацією та прийняттям рішень на вищому рівні.

### **Висновки до розділу**

Автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП) на основі мікропроцесорних контролерів дозволяють реалізовувати найдосконаліші алгоритми керування, які можна швидко переналаштовувати програмним шляхом при зміні динамічних параметрів. Впровадження АСК ТП призводить до підвищення рівня експлуатації та надійності систем керування, суттєвого покращення всіх економічних показників роботи об'єкта, збільшення терміну служби обладнання та зменшення витрат на його ремонт, а також значного підвищення показників енергозбереження.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

### 3.1 Вхідні та вихідні параметри для моделювання

Для розробки ефективної автоматичної системи керування трубчастою піччю необхідно чітко визначити її вхідні та вихідні параметри. Об'єктом керування є вертикальна циліндрична піч П-1, яка нагріває теплоносії Т-1 до температури 250°C для подальшого випаровування ДЕГ.

Основними збурюючими факторами, що впливають на процес, є:

- Витрата потоку ( $G_{prod}$ ).
- Вхідна температура потоку ( $T_{in}$ ).
- Температура повітря ( $T_{air}$ ).
- Температура палива ( $T_{fuel}$ ).

Ці фактори можуть змінюватися незалежно від керуючих дій і впливати на стабільність процесу.

Основними регулюючими діями, за допомогою яких система керування впливає на об'єкт, є:

- Витрата паливної суміші ( $G_{fuel\_mix}$ ).
- Відношення паливної суміші ( $\alpha_{fuel\_mix}$ ), що відображає співвідношення палива та повітря.

До вихідних координат, які є вимірюваними параметрами, що характеризують стан процесу, належать:

- Температура технологічного потоку ( $T_{prod\_out}$ ).
- Температура димових газів ( $T_{flue\_gas}$ ).

Точне визначення цих параметрів є фундаментальним для розробки математичної моделі, оскільки вони формують основу для рівнянь, що описують динаміку системи, та для подальшого синтезу регуляторів.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк. 28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.2 Рівняння теплового балансу та структурна схема

Трубчаста піч є складним багатовимірним об'єктом зі змінними динамічними властивостями під час експлуатації. Для її математичного опису використовуються рівняння теплового балансу.

Запишемо рівняння теплового балансу для потоку:

$$G_n C_{pn} (T_{n\text{вих}} - T_{n\text{вх}}) = G_g C_{pg} (T_z - T_g), \quad (3.1)$$

а для процесу горіння:

$$G_{\text{нал}} g_{\text{нал}} = (G_{\text{нал}} C_{\text{рнал}} + G_{\text{нов}} C_{\text{рнов}}) T_z - G_{\text{нал}} C_{\text{рнал}} T_{\text{нал}} - G_{\text{нов}} C_{\text{рнов}} T_{\text{нов}}, \quad (3.2)$$

де  $G_n, G_g, G_{\text{нал}}, G_{\text{нов}}$  – витрата продукту димових газів, палива, повітря відповідно;

$g_{\text{нал}}$  – питома теплота згорання палива;

$T_{n\text{вих}}, T_{n\text{вх}}$  – температура продукту на виході та вході відповідно;

$T_z, T_{\text{нов}}, T_g$  – температура горіння, повітря, димових газів.

З рівняння (3.1) і (3.2) визначимо вихідну температуру технологічного потоку.

$$T_{n\text{вих}} = T_{n\text{вх}} - \frac{G_g C_{pg}}{G_n C_{pn}} \cdot T_g + \frac{G_{\text{нал}} (j-1) C_{pg}}{G_n C_{pn} (C_{\text{рнал}} + j C_{\text{рнов}})} (g_{\text{нал}} + C_{\text{рнал}} T_{\text{нал}} + j C_{\text{рнов}} T_{\text{нов}}), \quad (3.3)$$

де  $j = \frac{G_{\text{нов}}}{G_{\text{нал}}}$  – коефіцієнт співвідношення повітря та палива.

З цих рівнянь можна визначити вихідну температуру технологічного потоку, враховуючи коефіцієнт співвідношення повітря та палива ( $\alpha$ ). Структурна схема печі відображає інформаційні потоки та взаємозв'язки між вхідними, вихідними та проміжними параметрами, що дозволяє візуалізувати складність об'єкта керування.

### 3.3 Експериментальне дослідження динамічних характеристик

Робота трубчастої печі значно впливає на режим роботи інших технологічних апаратів, а якість отриманих продуктів та техніко-економічні показники установки значною мірою залежать від теплового та технологічного режимів печі. Рівень автоматизації трубчастих печей відстає від інших технологічних апаратів через недостатнє вивчення їхніх особливостей, відсутність

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

адекватних математичних моделей та алгоритмів керування, а також відсутність методів безперервного вимірювання ключових параметрів (рисунок 3.1).

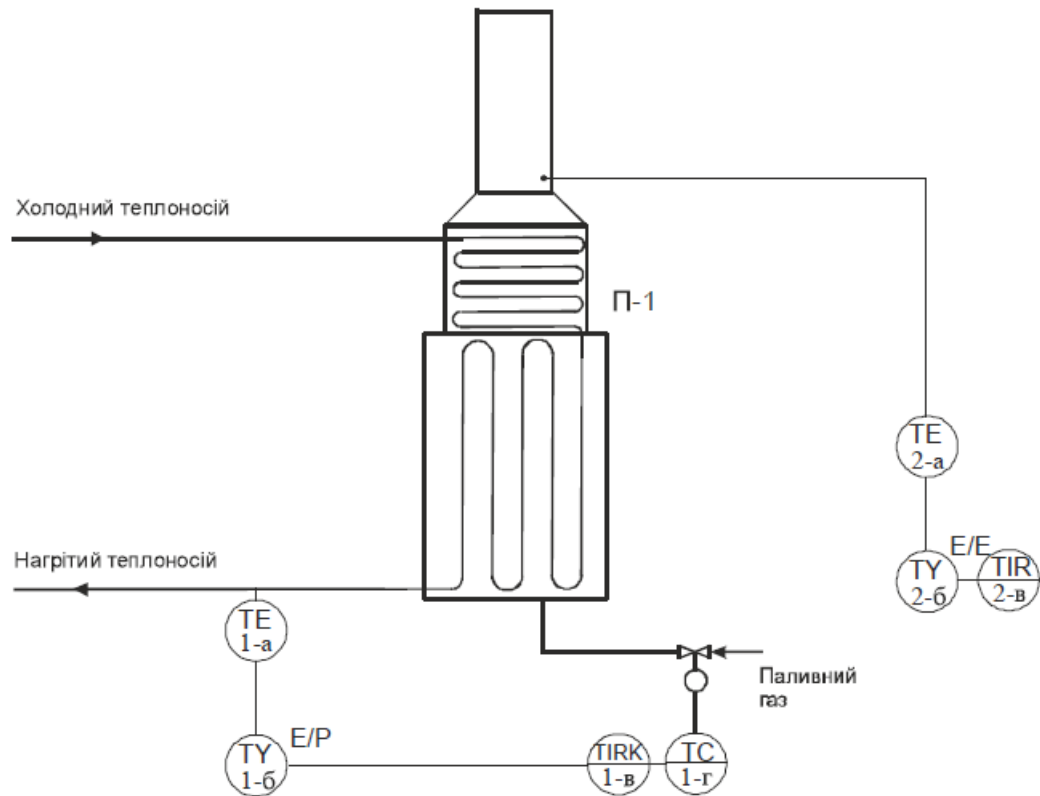


Рисунок 3.1 – ФСА проведення експерименту

Визначення динамічних характеристик керованого об'єкта математичними методами часто не враховує різноманітні збурюючі впливи, що діють на систему, що може призвести до значних похибок у моделі. Оскільки ці збурення суттєво впливають на роботу печі, більш точним підходом є експериментальне дослідження динамічних характеристик. Це дозволяє отримати модель, яка краще відображає реальну поведінку об'єкта в умовах виробництва, враховуючи непередбачувані фактори, що важко або неможливо кількісно описати теоретично. Такий підхід є критично важливим для забезпечення адекватності моделі, що є фундаментальною вимогою для синтезу ефективних систем керування.

Важливість емпіричної валідації динамічних моделей полягає в тому, що експериментальні дані є вирішальними для створення точних моделей, особливо з

огляду на невраховані збурення. Чисто математичні моделі можуть не повністю відображати складну взаємодію факторів у реальних промислових умовах, включаючи шум та нелінійності, які важко передбачити. Експериментальна ідентифікація дозволяє "зловити" ці реальні динаміки, що робить отримані передавальні функції більш надійними для проектування регуляторів.

### **3.4 Експериментальне визначення динамічних характеристик КО за допомогою детермінованих збурюючих впливів**

Процес експериментального визначення динамічних характеристик починається з ретельної підготовки та планування. Необхідно вивчити об'єкт дослідження та усунути всі можливі джерела шумів та збурень, окрім досліджуваного. Далі проводиться підготовка апаратури, що включає вибір високоточного, швидкодіючого та надійного реєструючого приладу (клас точності не нижче 0,5), здатного фіксувати зміну вихідної змінної. Реєструюча змінна повинна займати значну частину діаграмного бланка (100-200 мм по ширині та 200-250 мм по довжині).

При плануванні експерименту обирається вид досліджуваного впливу, його амплітуда та початкове значення вихідної змінної. У цьому випадку, збурюючим впливом є стрибок подачі кількості паливної суміші. Амплітуда вхідного впливу зазвичай обирається в інтервалі  $(0,1-0,2)\Delta x_{vх.max}$ , де  $\Delta x_{vх.max}$  – це 100% переміщення регулюючого органу.

Експеримент починається з встановлення стабільного режиму роботи об'єкта, при якому вихідна змінна та всі впливаючі на неї змінні є постійними. Цей режим витримується протягом 2-2,5 хв. Потім вноситься збурення шляхом відкриття регулюючого органу на 10-20%, і починається реєстрація зміни вихідної величини (температури теплоносія) у часі. Одночасно, за можливості, записуються зміни основних збурюючих впливів, насамперед навантаження об'єкта. Експеримент вважається закінченим, коли вихідна змінна стабілізується, наприклад, коли теплоносій нагрівається до 250°C.

Для підвищення точності експериментальна перехідна характеристика

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

знімається двічі, а отримані дані усереднюються та згладжуються.

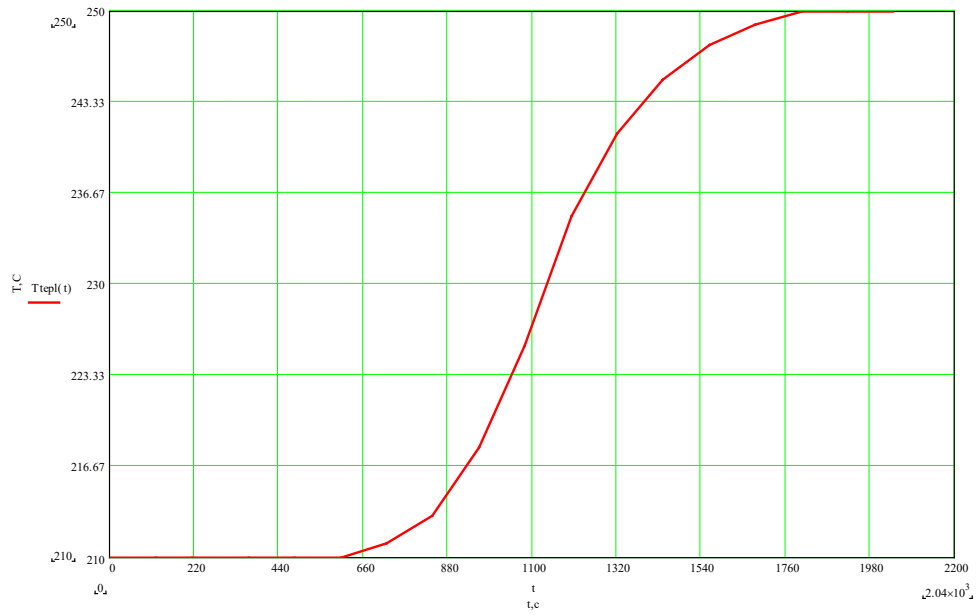


Рисунок 3.2 – Експериментальна перехідна характеристика по каналу регулювання температури теплоносія

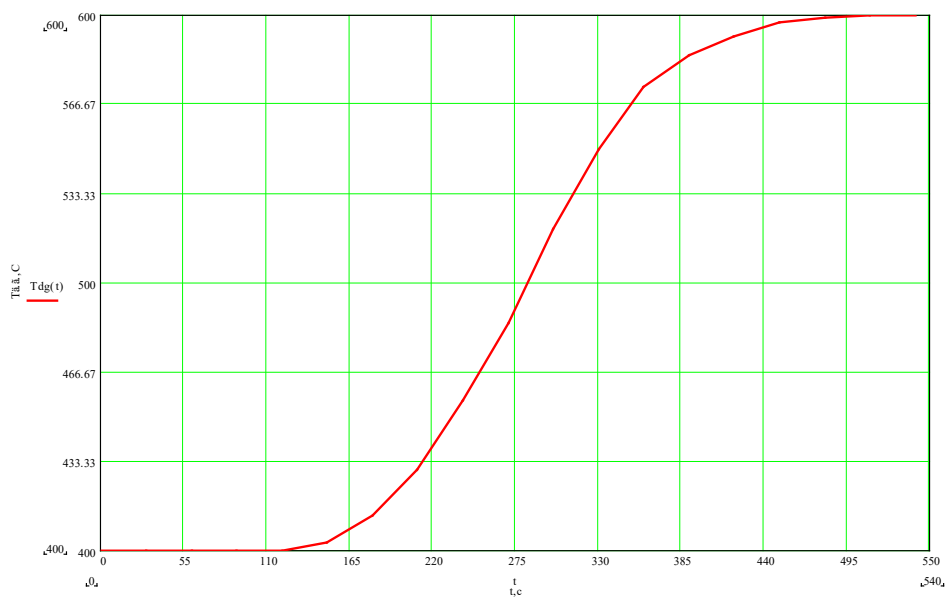


Рисунок 3.3 – Експериментальна перехідна характеристика по каналу регулювання температури димових газів

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

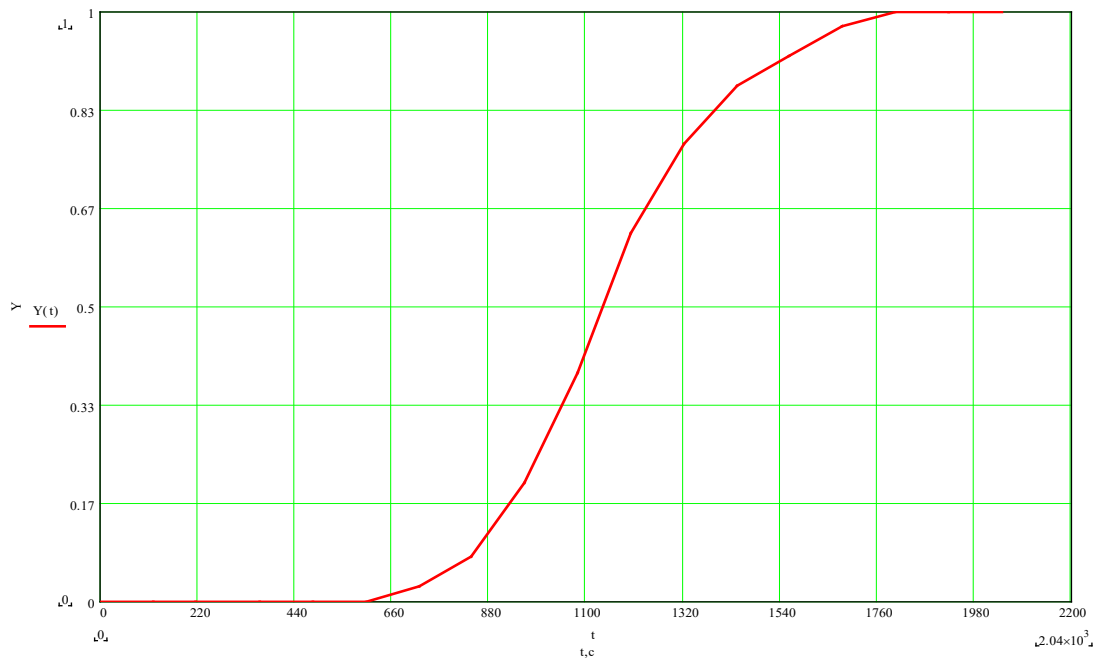


Рисунок 3.4 – Експериментальна перехідна характеристика по каналу регулювання температури теплоносія в безрозмірних величинах

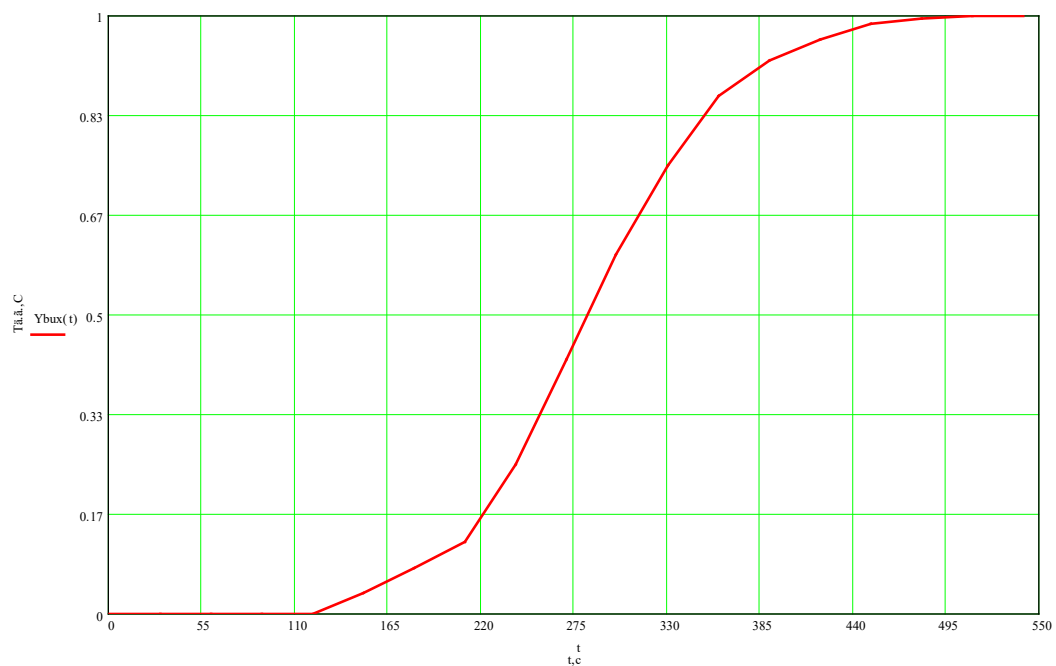


Рисунок 3.5 – Експериментальна перехідна характеристика по каналу регулювання температури димових газів в безрозмірних величинах

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На основі цих експериментальних даних, використовуючи стандартні програми апроксимації, визначаються передавальні функції об'єкта. Для каналу регулювання температури теплоносія отримана передавальна функція :

$$W_1(p) = \frac{-354.143p + 1}{231906.99p^2 + 801.857p + 1} \cdot e^{-600p}$$

Для каналу регулювання температури димових газів отримана передавальна функція :

$$W_2(p) = \frac{-71.39p + 1}{11733.961p^2 + 183.01p + 1} \cdot e^{-120p}$$

Максимальна похибка апроксимації перехідних характеристик становить менше 2,5%.

### Висновки до розділу

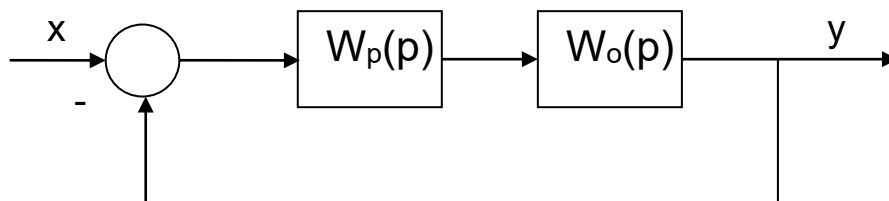
Виведення передавальних функцій другого порядку з запізненням м з експериментальних даних є вирішальним кроком, що поєднує емпіричні спостереження з теоретичним проектуванням керування. Точність цих виведених моделей (зазначена як менше 2.5% похибки ) безпосередньо впливає на ефективність синтезованих контролерів. Передавальні функції є математичним "відбитком" динаміки системи в частотній області, що є важливим для аналітичного проектування контролера. Точність цих моделей є першочерговою. Високоточна модель дозволяє точно налаштувати контролер, що призводить до оптимальної продуктивності. І навпаки, погана модель призведе до субоптимального або нестабільного керування, підкреслюючи важливість ретельної експериментальної характеристики.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

### 4.1 Розрахунок та аналіз одноконтурної АСК температури теплоносія

Об'єкт керування, трубчаста піч, є об'єктом із самовирівнюванням, що працює на повільно змінних навантаженнях і описується передавальною функцією другого порядку. Для забезпечення необхідних показників якості регулювання, таких як перерегулювання (30-40%) та підвищення стійкості системи, обирається ПІ-регулятор. Статична похибка процесу регулювання для такого регулятора дорівнює нулю.



$W_p(p)$  – передавальна функція регулятора;

$W_o(p)$  – передавальна функція об'єкта.

Рисунок 4.1 - Структурна схема одно контурної АСК

Параметри налаштування ПІ-регулятора ( $C1$  та  $C0$ ) визначаються за допомогою спеціалізованих програм. Коефіцієнт передачі регулятора ( $Kp$ ) та час інтегрування ( $Ti$ ) розраховуються на основі отриманих параметрів. Наприклад, для одноконтурної АСК температури теплоносія  $Kp=0,387$ , а час інтегрування  $Ti=558$  с. Границя пропорційності ( $\delta$ ) та час ізодрому ( $Tіз$ ) також встановлюються на органах налаштування регулятора.

$$W_p(P) = \frac{0.387p + 5.958 \cdot 10^{-4}}{p} \quad (4.1)$$

Структурна схема одноконтурної АСК відображає взаємодію регулятора та об'єкта. Передавальна функція замкнутої системи виводиться шляхом підстановки передавальних функцій регулятора та об'єкта.

$$W(p) = \frac{137.05p^2 + 0.176p + 5.958 \cdot 10^{-4}}{231906.99p^3 + 801.857p + p} \quad (4.2)$$

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Дослідження стійкості АСК проводиться за критерієм Гурвіца, який підтверджує стійкість системи.

Оцінка якості АСК виконується за допомогою амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) та перехідної характеристики (рисунк 4.2 і рисунок 4.3).

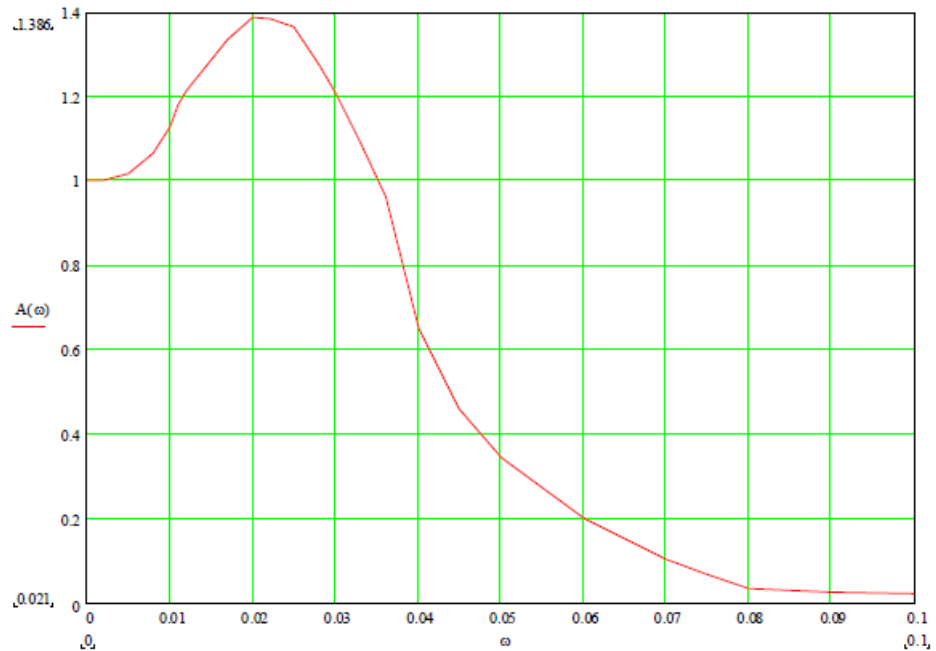


Рисунок 4.2 – АЧХ АСК температури теплоносія

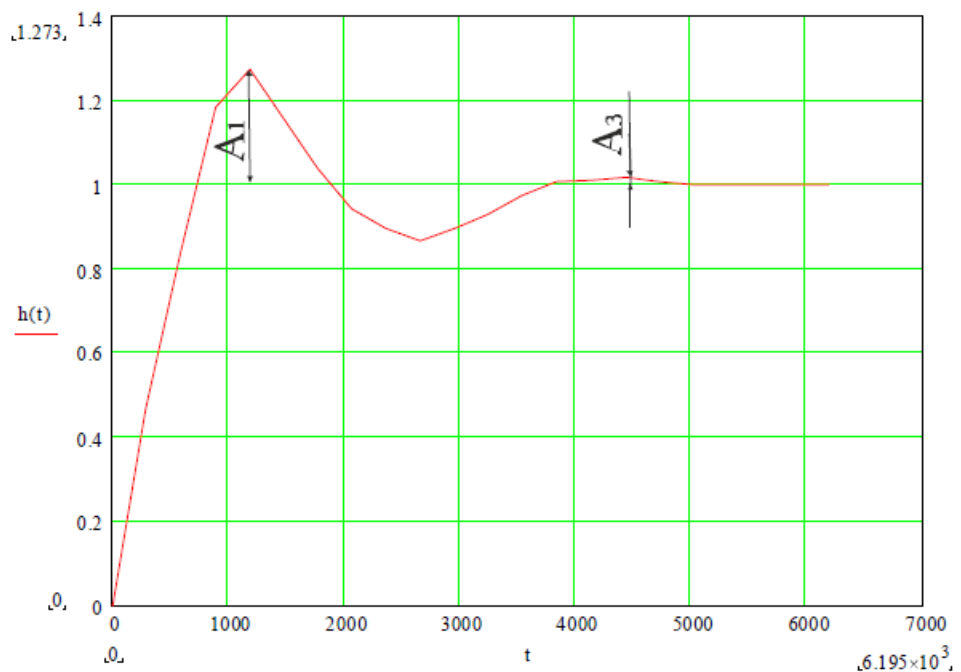


Рисунок 4.3 – Перехідна характеристика АСК температури теплоносія

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

За АЧХ визначаються такі показники, як частотний показник коливальності та резонансна частота. За перехідною характеристикою, отриманою за допомогою комп'ютерного моделювання, визначаються прямі показники якості: перерегулювання ( $\delta$ ), ступінь затухання ( $\Psi$ ), час перехідного процесу ( $t_n$ ) та час досягнення першого максимуму ( $t_M$ ). Для одноконтурної АСК температури теплоносія час перехідного процесу становить 5310 с, а час досягнення першого максимуму – 1180 с.

#### **4.2 Розрахунок та аналіз одноконтурної АСК температури димових газів**

Для регулювання температури димових газів також обирається ПІ-регулятор. Параметри налаштування регулятора ( $C_1$  та  $C_0$ ) визначаються за допомогою програми. Коефіцієнт передачі регулятора ( $K_p$ ) та час інтегрування ( $T_i$ ) розраховуються аналогічно. Для цього каналу  $K_p=0,415$ , а час інтегрування  $T_i=42$  с. Відповідно, границя пропорційності ( $\delta$ ) та час ізодрому ( $T_{із}$ ) встановлюються на органах налаштування регулятора.

Структурна схема АСК та передавальна функція замкнутого контуру формуються за тими ж принципами, що й для АСК температури теплоносія. Дослідження стійкості за критерієм Гурвіца також підтверджує стійкість отриманої АСК.

Оцінка якості цієї одноконтурної АСК проводиться за допомогою АЧХ та перехідної характеристики (рисунок 4.4 і рисунок 4.5).

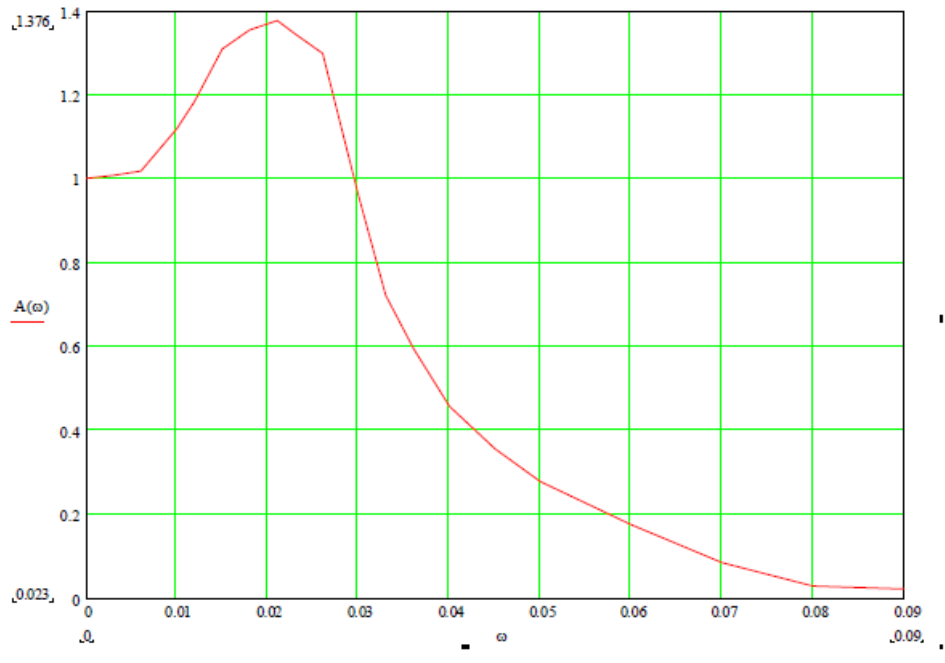


Рисунок 4.4 – АЧХ АСК температури димових газів

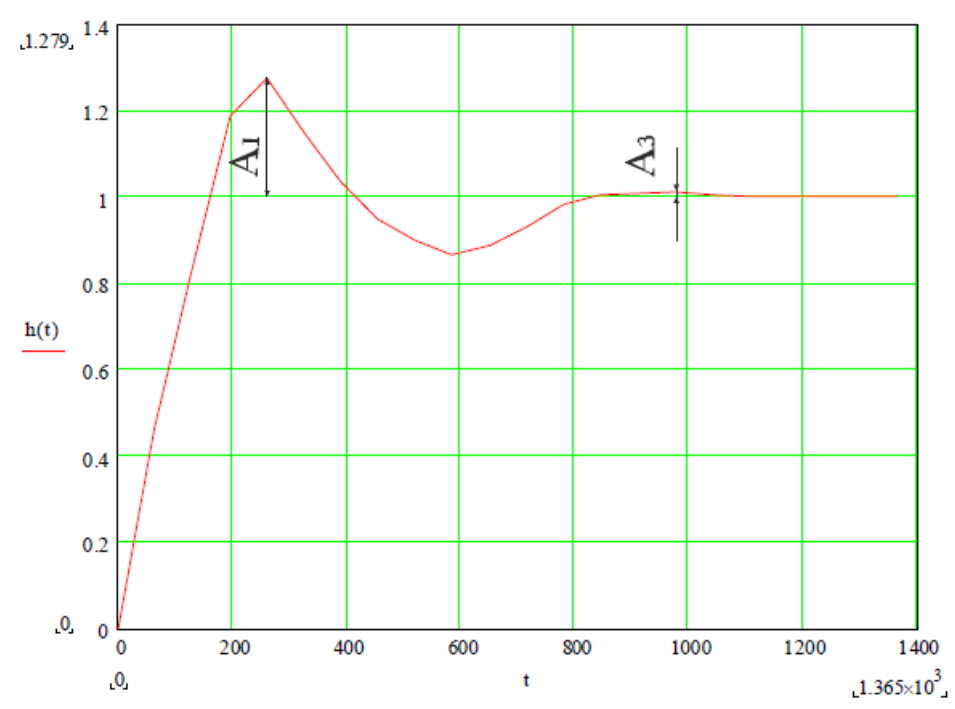
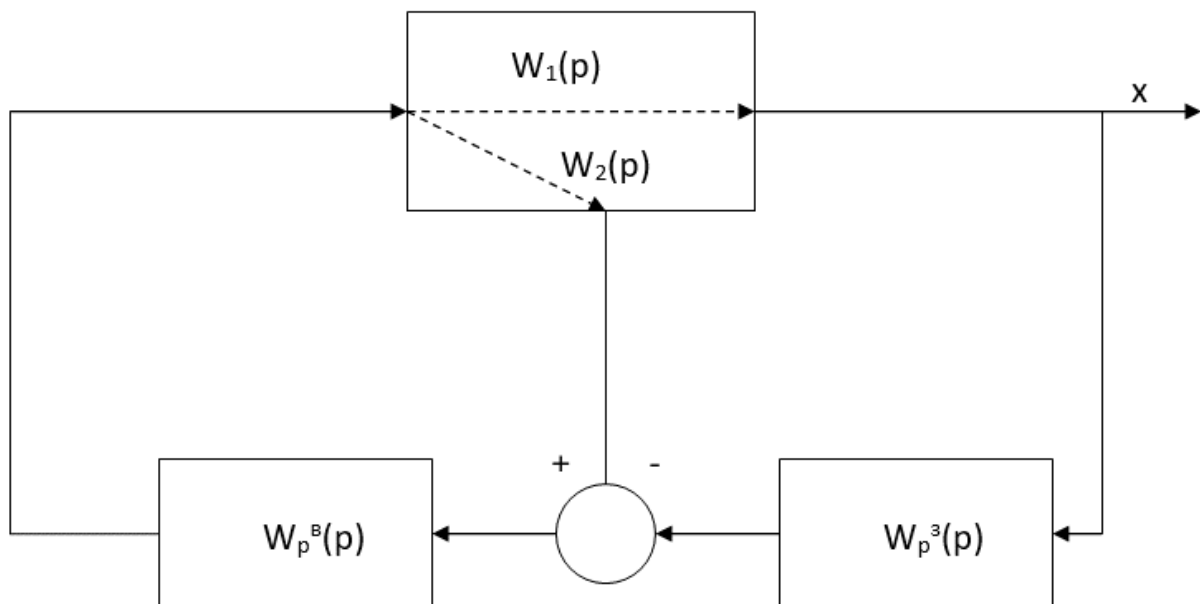


Рисунок 4.5 – Перехідна характеристика АСК температури димових газів

Визначаються частотний показник коливальності та резонансна частота. За перехідною характеристикою встановлюються прямі показники якості: перерегулювання, ступінь затухання, час перехідного процесу ( $t_n=1170$  с) та час досягнення першого максимуму ( $t_M=260$  с).

#### 4.3 Каскадна АСК температури. Оптимізація та порівняльний аналіз

Для реалізації каскадної АСК до основного контуру регулювання температури теплоносія додається допоміжний малоінерційний контур регулювання температури димових газів. Передавальні функції для обох каналів були визначені раніше. Структурна схема каскадної АСК відображає це поєднання (рисунок 4.6). Розрахунок починається з основного регулятора, оскільки інерційність допоміжного каналу значно менша, ніж основного.



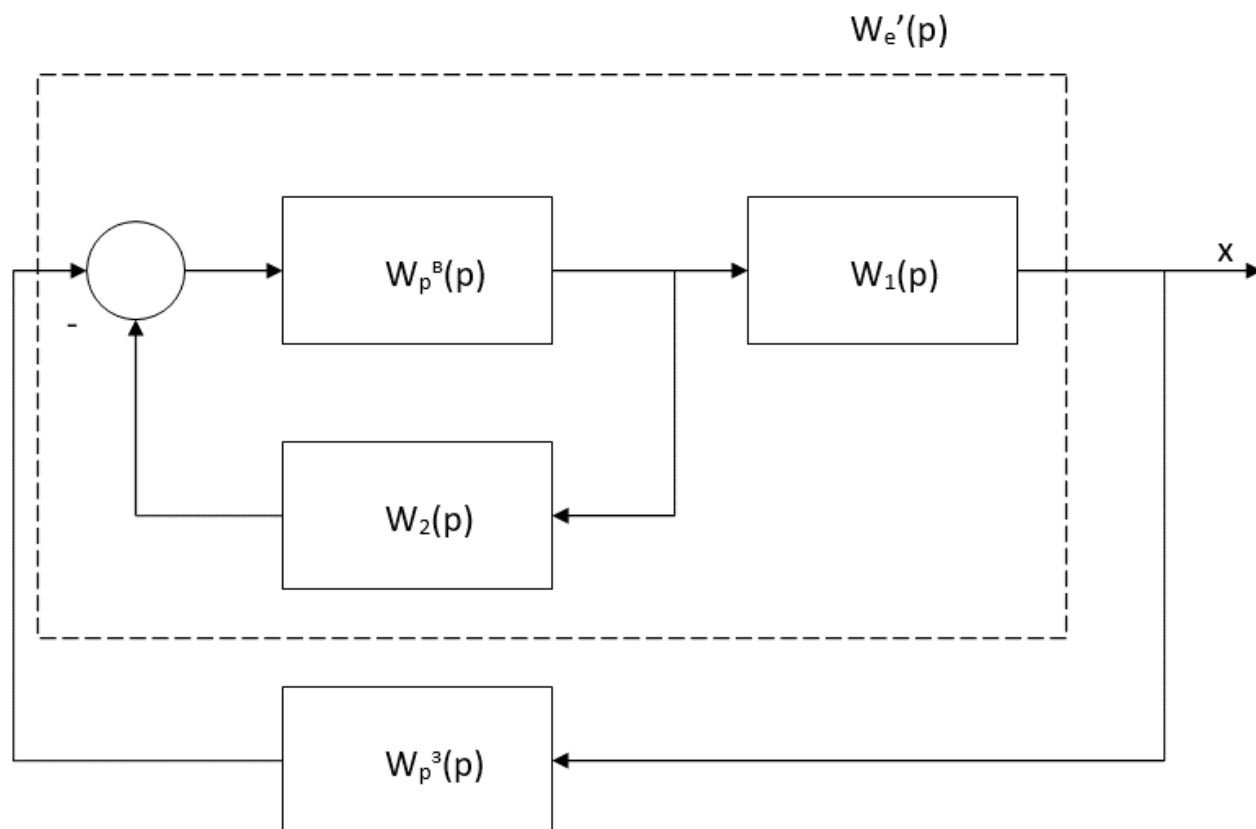
$W_1(p)$  – передавальна функція по каналу регулювання температури теплоносія;  $W_2(p)$  – передавальна функція по каналу регулювання температури димових газів;  $W_p^B(p)$  – передавальна функція внутрішнього регулятора;  $W_p^3(p)$  – передавальна функція зовнішнього регулятора.

Рисунок 4.6 - Структурна схема каскадної АСК

Для еквівалентного об'єкта основного контуру обирається ПІ-регулятор,

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

оптимальні параметри налаштування якого розраховуються за допомогою програми. Аналогічно розраховуються параметри налаштування внутрішнього (допоміжного) ПІ-регулятора.



$W_1(p)$  – передавальна функція по каналу регулювання температури теплоносія;  $W_2(p)$  – передавальна функція по каналу регулювання температури димових газів;  $W_p^B(p)$  – передавальна функція внутрішнього регулятора;  $W_p^3(p)$  – передавальна функція зовнішнього регулятора.

Рисунок 4.7 - Структурна схема для розрахунку зовнішнього регулятора

Після розрахунку встановлюються додаткові параметри налаштування, такі як коефіцієнт передачі, час інтегрування, границя пропорційності та час ізодрому для обох регуляторів.

Еквівалентна передавальна функція замкнутої каскадної АСК виводиться шляхом підстановки передавальних функцій всіх елементів системи. Оцінка стійкості каскадної АСК проводиться за критерієм Гурвіца, що підтверджує її стабільність. Якісна оцінка каскадної АСК також виконується за допомогою АЧХ



контуром.

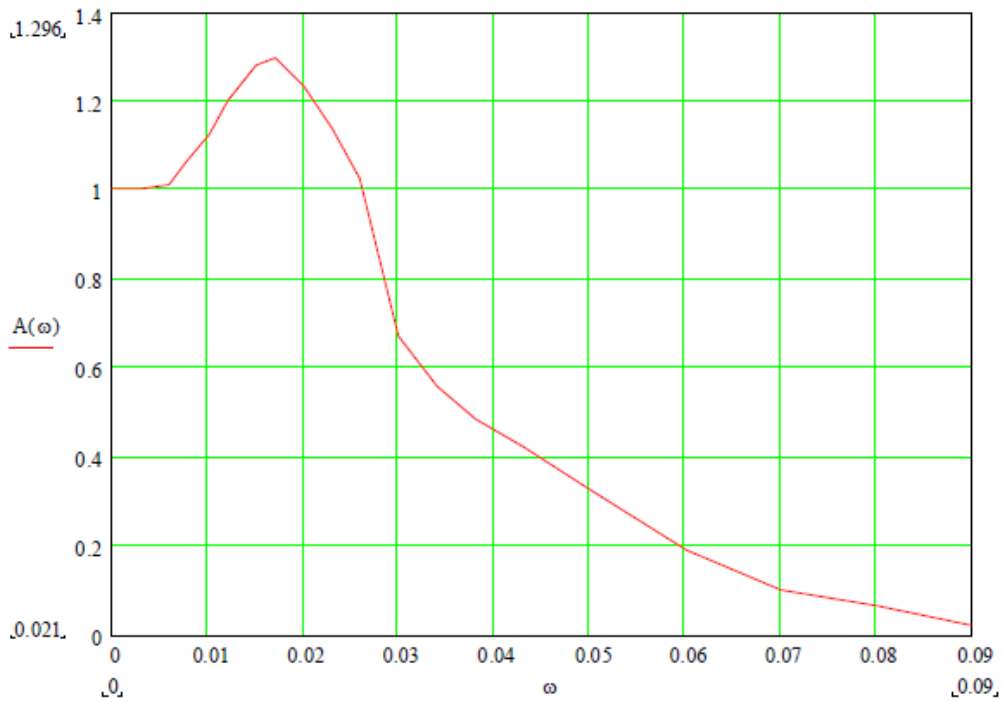


Рисунок 4.9 – АЧХ каскадної АСК

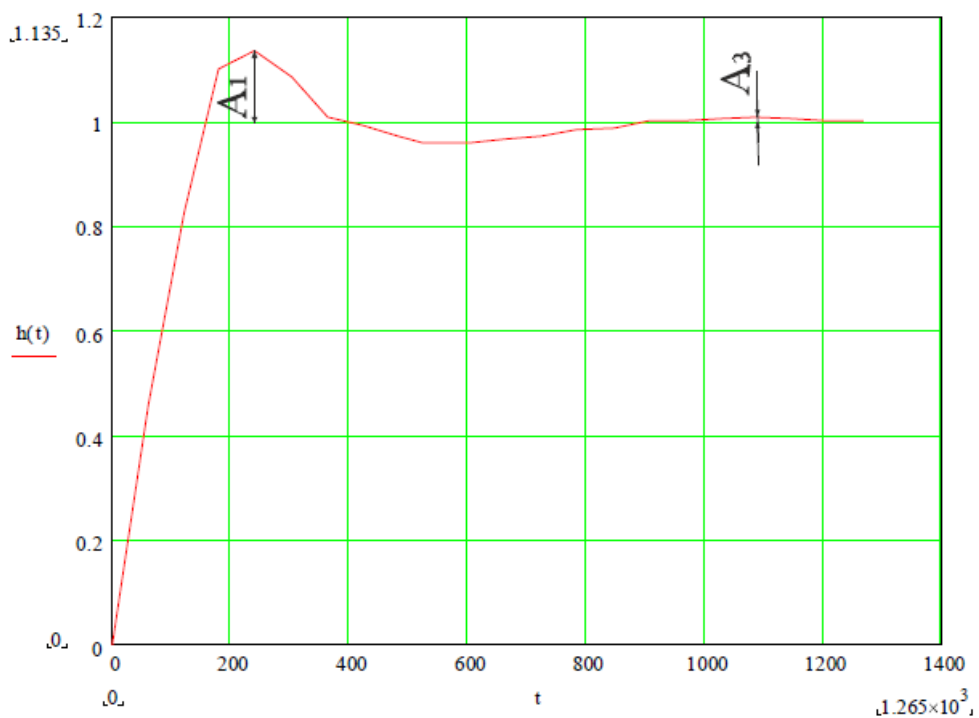


Рисунок 4.10 – Перехідна характеристика каскадної АСК

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ

Арк.

42

Швидкодія системи зростає у 60 разів при переході від регулювання по виходу до регулювання по перевалу або перевалу-виходу. Це кількісне підтвердження переваг каскадного керування підкреслює його здатність долати інерцію процесу, використовуючи швидші проміжні змінні.

#### **4.4 Удосконалення системи подачі повітря**

Для збільшення ефективності та економного використання паливного газу необхідно розрахувати оптимальний об'єм повітря, який потрібно подати в піч для спалювання цього газу. Розрахунок складу палива та теоретичної кількості повітря, необхідної для згоряння, проводиться на основі хімічного складу газу та коефіцієнта надлишку повітря. Регулювання витрати повітря залежно від витрати природного газу може бути реалізовано за рахунок регулятора співвідношення повітря-газ. Це забезпечує оптимальне згоряння, мінімізуючи надлишок повітря, що зменшує втрати тепла з димовими газами та підвищує загальну теплову ефективність печі.

#### **4.5 Рекомендації щодо вдосконалення систем керування трубчастими печами**

Пріоритетне впровадження каскадних АСК: Для існуючих та нових трубчастих печей рекомендується пріоритетне впровадження каскадних систем автоматичного керування. Це забезпечить значне покращення якості регулювання, зменшення енергоспоживання та підвищення безпеки порівняно з традиційними одноконтурними рішеннями.

Інтеграція розширених стратегій керування: Для подальшої оптимізації та підвищення робастності системи слід розглянути інтеграцію передових парадигм керування:

Адаптивне керування: Застосування адаптивних алгоритмів дозволить системі автоматично коригувати параметри регуляторів у відповідь на зміни якості палива, складу сировини або динаміки процесу, забезпечуючи оптимальну роботу в умовах невизначеності.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модельне предиктивне керування (MPC): Впровадження MPC дозволить прогнозувати поведінку печі та оптимізувати керуючі дії з урахуванням обмежень, що є особливо цінним для складних багатовимірних процесів у нафтопереробці.

Керування на основі нечіткої логіки: Для процесів, де важко отримати точні математичні моделі, або де важливо врахувати емпіричні знання операторів, нечітка логіка може забезпечити гнучке та ефективне керування.

Розробка інтегрованих та ієрархічних АСК ТП: Для досягнення максимальної ефективності на рівні всього підприємства, системи керування трубчастими печами повинні бути інтегровані в багаторівневі ієрархічні АСК ТП. Це дозволить координувати роботу окремих агрегатів, оптимізувати матеріальні потоки та забезпечувати прийняття рішень на різних рівнях управління, від локального до супервізорного та організаційного.

Постійний моніторинг та діагностика стану обладнання: Враховуючи вплив термічної деградації теплоносіїв та матеріалів на ефективність та безпеку печі, рекомендується розробка та впровадження систем постійного моніторингу стану труб, футерівки та теплоносія. Це дозволить здійснювати предиктивне обслуговування, запобігати аваріям та оптимізувати інтервали між ремонтами.

Оптимізація системи подачі повітря: Подальше вдосконалення системи подачі повітря з використанням регуляторів співвідношення повітря-газ є критично важливим для забезпечення повного та економічного згоряння палива, що безпосередньо впливає на ККД печі.

Впровадження цих рекомендацій сприятиме не лише підвищенню технологічної ефективності та безпеки експлуатації трубчастих печей, але й забезпечить значні економічні вигоди за рахунок оптимізації енергоспоживання та покращення якості кінцевої продукції у вуглеводневій переробці.

### **Висновки до розділу**

Проведене дослідження успішно розробило та валідувало ефективну систему автоматичного керування для трубчастих печей, зосередившись на

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

каскадній архітектурі керування. Впровадження цієї системи суттєво підвищило ефективність процесу нагрівання, оптимізувавши витрати енергії, зменшивши відхилення від заданого температурного режиму та покращивши якість кінцевого продукту.

Розроблена математична модель процесу нагрівання адекватно описує його динаміку, що дозволило створити ефективний алгоритм керування. Правильний вибір датчиків та виконавчих механізмів, а також розроблений алгоритм керування забезпечили стійку роботу системи, високу точність регулювання температури та швидку реакцію на зміни зовнішніх умов. Імітаційне моделювання підтвердило ефективність розробленої системи керування в реальних умовах.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Аналіз функціонування трубчастих печей у вуглеводневій переробці та систем їх автоматичного керування виявив низку ключових аспектів, що визначають ефективність, безпеку та економічність виробничих процесів. Трубчасті печі є складними багатовимірними об'єктами, що характеризуються значними часовими затримками, нелінійностями та впливом численних збурень. Ці фактори створюють серйозні виклики для керування, оскільки відхилення від оптимальних режимів призводять до зниження якості продукції, збільшення енергоспоживання та підвищення ризиків для безпеки.

Експериментальна ідентифікація динамічних характеристик об'єкта, зокрема за допомогою крокових тестів, виявилася критично важливою для отримання адекватних математичних моделей. Такі моделі, на відміну від суто теоретичних, враховують невраховані збурення та реальну поведінку системи в умовах виробництва, що є фундаментальним для точного синтезу регуляторів.

Порівняльний аналіз архітектур систем керування чітко продемонстрував обмеження одноконтурних АСК. Їхня простота та надійність не компенсують низьку ефективність усунення збурень та тривалі перехідні процеси, особливо в умовах значних часових затримок (до 300 с для основного каналу). Це створює фундаментальний компроміс між швидкодією та стабільністю, який часто призводить до компромісів у продуктивності або безпеці.

На противагу цьому, каскадні системи керування показали значні переваги. Використання допоміжного, швидшого контуру (наприклад, для регулювання температури димових газів із затримкою близько 5 с) дозволяє ефективно усувати збурення на ранній стадії, перш ніж вони вплинуть на основний керований параметр. Це призводить до підвищення точності, прискорення перехідних процесів (до 60 разів) та зменшення перерегулювання, що безпосередньо впливає на економічні показники та якість продукції.

Отримані в ході даного дослідження результати мають значний науковий та практичний потенціал, що відкриває широкі можливості для їх застосування.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Розроблені підходи можуть бути використані для оптимізації подібних процесів нагрівання в інших галузях промисловості, де точний температурний контроль є ключовим фактором.

Методологія та алгоритми, застосовані в цьому дослідженні, стануть основою для розробки нових, більш досконалих систем автоматизації для різноманітних технологічних об'єктів. Завдяки оптимізації споживання енергії, результати дослідження сприятимуть значному підвищенню енергоефективності виробничих процесів, що є актуальною задачею в сучасній промисловості.

Точне та стабільне керування температурними режимами безпосередньо впливає на покращення якості кінцевої продукції, знижуючи кількість браку та підвищуючи конкурентоспроможність.

Таким чином, виконане дослідження є цінним внеском у розвиток автоматизації технологічних процесів. Його результати можуть бути успішно використані для вирішення широкого спектру актуальних інженерних та промислових задач, що сприятиме вдосконаленню виробничих потужностей та підвищенню їх економічної ефективності.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Боровик М. П., Фещенко В. М. Автоматизація технологічних процесів. – К.: Вища школа, 2012. – 328 с.
2. Болюх В. О., Козаченко А. І. Теорія автоматичного керування. – К.: Каравела, 2015. – 384 с.
3. Білан С. О., Клименко А. В. Системи автоматичного керування: навчальний посібник. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – 240 с.
4. Морозов Ю. І. Елементи і пристрої систем автоматизації. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 292 с.
5. Савченко О. В., Дьяків О. В. Програмовані логічні контролери в системах автоматизації. – К.: Ліра-К, 2020. – 288 с.
6. Ковальчук В. П. Системи автоматичного управління: підручник. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – 336 с.
7. Гаврилюк В. С. Автоматизація промислових об'єктів та процесів. – К.: Основа, 2013. – 256 с.
8. Дяченко С. М. Сенсори та виконавчі механізми в системах автоматизації. – Одеса: ОНАХТ, 2017. – 310 с.
9. Романенко І. М., Кириченко О. Ю. Мікропроцесорні засоби автоматизації. – Дніпро: ДНУ, 2021. – 290 с.
10. Науменко С. М. SCADA-системи в автоматизації: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 200 с.

					ДП.АКП-17.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		