

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП -50.00.00.000 ПЗ

група АКП -23-1К

Артур Леоненко

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

Леоненко Артур Степанович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.53
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Моделювання системи автоматизованого регулювання для досягнення
(назва роботи)

економічності горіння барабанного котла

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

Здобувач освітнього ступеня

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

Науковий керівник

доцент О.В. Кучмистенко
(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 АКТ

А.І. Лагойда.

«___» _____ 2025 року

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

Леоненку Артуру Степановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Моделювання системи автоматизованого регулювання
для досягнення економічності горіння барабанного котла**

керівник роботи Кучмистенко Олександр Васильович к.т.н., доцент

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

затверджені 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 переддипломної практики,
методичні вказівки, технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу горіння у барабанному котлі, як об'єкта автоматизації.

2. Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування.

3. Аналіз та синтез системи автоматизованого регулювання основних технологічних параметрів барабанного котла.

4. Розробка проектної складової САК барабанного котла

5 Загальні висновки.

Перелік посилань на джерела.

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

Лист 1 – Технологічна схема барабанного котла – БР.АКТ – 50.00.00.000 01;

Лист 2 – Взаємозв'язки вхідних та вихідних параметрів у барабанному котлі – БР.АКТ – 50.00.00.000 02;

Лист 3 – Аналіз і синтез каскадної АСР – БР.АКТ – 50.00.00.000 03;

Лист 4 – Функціональна схема автоматизації – БР.АКТ – 50.00.00.000 04;

Лист 5 – Схема зовнішніх з'єднань – БР.АКТ – 50.00.00.000 05;

Лист 6 – Схема щита керування – БР.АКТ – 50.00.00.000 06.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу горіння у барабанному котлі, як об'єкта автоматизації	13.05.2025 р.	
2	Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування	11.05.2025 р.	
3	Аналіз та синтез системи автоматизованого регулювання основних технологічних параметрів барабанного котла	13.05.2025 р.	
4	Розробка проектної складової САК барабанного котла	21.05.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

А.С. Леоненко _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

О.В. Кучмистенко _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 75 сторінок друкованого тексту, 17 рисунків, 2 таблиці, 12 посилання на джерела.

Тема: «Моделювання системи автоматизованого регулювання для досягнення економічності горіння барабанного котла».

Об'єкт дослідження: процес горіння у топці барабанного котла.

Мета проєкту: розробка та моделювання системи автоматизованого регулювання, яка забезпечує економічне використання палива в процесі горіння барабанного котла шляхом оптимізації співвідношення повітря і палива та температури перегрітої пари. Для реалізації цього завдання в проєкті застосовано сучасне обладнання й технічні засоби автоматизації, які забезпечують стабільність, точність та енергоефективність функціонування системи.

Методи дослідження: математичне моделювання динаміки теплотехнічного процесу горіння, лінеаризація моделі об'єкта керування, синтез ПД-регулятора, побудова імітаційної моделі в MATLAB Simulink, а також експериментальне визначення параметрів регуляторів і аналіз динамічних характеристик автоматизованої системи.

Результати бакалаврської роботи: представлено технічне обґрунтування вибору обладнання для реалізації автоматизованої системи регулювання процесу горіння. Розроблено математичну модель об'єкта керування, здійснено її лінеаризацію та синтезовано систему автоматичного регулювання у вигляді каскадної структури з внутрішнім і зовнішнім контурами. Проведено розрахунок параметрів регуляторів, змодельовано систему в MATLAB Simulink, виконано аналіз показників якості регулювання, що підтвердило ефективність розробленої системи з точки зору економії палива та стабілізації температурного режиму.

Ключові слова: барабанний котел, горіння, економічність, автоматизована система регулювання, ПД-регулятор, Simulink.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 75 pages of printed text, 17 figures, 2 tables, and 12 references.

Title: "Modeling of an Automatic Control System to Ensure Efficient Combustion of a Drum Boiler."

Object of research: the combustion process in the furnace of a drum boiler.

Project aim: the development and modeling of an automatic control system that ensures fuel-efficient combustion in a drum boiler by optimizing the air-fuel ratio and the temperature of superheated steam. To achieve this goal, the project employs modern equipment and automation tools that ensure system stability, accuracy, and energy efficiency.

Research methods: mathematical modeling of the thermal combustion process dynamics, linearization of the control object model, synthesis of a PI controller using the pole placement method, development of a simulation model in MATLAB Simulink, as well as experimental determination of controller parameters and analysis of the dynamic characteristics of the automated system.

Results of the bachelor's thesis: the thesis presents a technical rationale for selecting equipment used in implementing the combustion control system. A mathematical model of the control object was developed and linearized, and an automatic control system was synthesized in the form of a cascade structure with internal and external control loops. Controller parameters were calculated, the system was simulated in MATLAB Simulink, and performance indicators were analyzed, confirming the effectiveness of the proposed system in terms of fuel savings and stabilization of the temperature regime.

Keywords: drum boiler, combustion, efficiency, automatic control system, PI controller, Simulink.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ У БАРАБАННОМУ КОТЛІ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	11
1.1 Фізичні та термодинамічні основи процесу горіння в барабанному котлі....	11
1.2 Загальна технологічна схема котельної установки, яка працює на твердому паливі.....	13
1.3 Особливості процесу утворення пари в барабанних котлах із природною та примусовою циркуляцією	15
1.4 Особливості тепломасообміну у процесі горіння та утворення пари.....	17
1.5 Нелінійності та інерційність процесів як фактори, що ускладнюють автоматизацію	18
1.6 Взаємозв'язки між основними параметрами процесу в котельній установці, що працює на твердому паливі.....	20
1.7 Взаємозв'язки між основними параметрами процесу у котельній установці, що працює на твердому паливі.....	22
1.8 Аналіз системи автоматичного регулювання барабанних котлів	24
Висновки до розділу	30
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	32
2.1 Опис системи автоматичного регулювання барабанних котлів.....	32
2.2 Аналіз параметрів ефективної економії палива в барабанному котлі	34
2.3 Дослідження динаміки внутрішнього контуру (співвідношення витрат палива й повітря)	37
2.4 Дослідження динаміки зовнішнього контуру (температура перегрітої пари)	38

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Леоненко А.С.			Моделювання системи автоматизованого регулювання для досягнення економічності горіння барабанного котла	Літ.	Арк.	Акрюшів
Перевір.		Кучмистенко О.В.				Д	6	75
Реценз.		Чигур І.І.				АКП-23-1К ІФНТУНГ		
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.						
Затверд.		Лагойда А.І.						

Висновки до розділу	39
3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БАРАБАННОГО КОТЛА	40
3.1 Аналіз об'єктів керування	40
3.2 Аналіз стійкості каскадної АСР за критерієм Найквіста	43
3.2.1 Аналіз внутрішнього контуру.....	43
3.2.2 Аналіз зовнішнього контуру.....	44
3.2.3 Повна передавальна функція	45
3.3 Аналіз якості регулювання каскадної автоматичної системи регулювання	47
3.3.1 Аналіз перехідних процесів внутрішнього контуру.....	48
3.3.2 Аналіз перехідних процесів зовнішнього контуру.....	49
3.4 Частотний аналіз та діаграми Боде.....	50
3.5 Робастність та чутливість	52
Порівняльний аналіз з одноконтурною системою	52
Висновки до розділу	53
4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК БАРАБАННОГО КОТЛА.....	56
4.1 Система нормативної документації	56
4.2 Формування проектної документації	57
4.3 Вибір засобів автоматизації.....	60
4.4 Розробка схем для реалізації АСУ ТП	67
Висновки до розділу	68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	74

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ДСТУ - державний стандарт;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ПВС - пароповітряна суміш;

ПТ - перетворювач температури;

БК – барабанний котел.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Сучасні енергетичні установки, зокрема барабанні парові котли, залишаються основою теплогенерації в багатьох промислових галузях та енергетичних системах. В умовах постійного зростання вартості енергоресурсів, посилення екологічних вимог та необхідності забезпечення стабільності енергопостачання, актуальність підвищення ефективності спалювання палива набуває особливої ваги. Досягнення високих показників економічності роботи котла неможливе без впровадження сучасних підходів до керування процесами горіння, які враховують динаміку теплообміну, особливості подачі пального та повітря, а також необхідність забезпечення заданих параметрів пари.

У контексті автоматизації технологічних процесів виникає потреба у побудові таких систем регулювання, які здатні адаптуватися до змін навантаження, коливань якості палива та нестационарних режимів роботи. Це зумовлює необхідність використання математичного моделювання для опису динамічних характеристик об'єкта, зокрема процесів у топці, конвективних та радіаційних теплообмінниках, а також у водяному та паровому просторі барабана. Створення адекватної моделі дозволяє не лише досліджувати поведінку системи в умовах збурень, але й формувати алгоритми автоматичного керування, які забезпечують мінімізацію втрат тепла, скорочення витрат пального та зменшення емісії забруднюючих речовин.

Особливе значення при цьому має розгляд взаємозв'язку між основними енергетичними показниками, такими як температура й тиск пари, витрата повітря та співвідношення повітря-паливо, з урахуванням інерційності процесів і часових затримок у системі. Урахування цих факторів є визначальним для побудови ефективного регулятора, здатного підтримувати режим оптимального горіння за різних зовнішніх і внутрішніх умов. Розробка такої системи потребує не лише глибокого аналізу фізичних процесів у котлі, але й застосування чисельних методів моделювання, зокрема диференціальних рівнянь, методів

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

ідентифікації параметрів об'єкта, а також синтезу алгоритмів адаптивного керування.

Таким чином, дослідження, присвячене моделюванню автоматизованої системи регулювання з урахуванням мети досягнення економічності горіння в барабанному котлі, становить вагомий напрям у контексті підвищення енергоефективності промислових установок. Такий підхід дозволяє не лише забезпечити відповідність технічним вимогам, а й сприяє реалізації стратегій сталого розвитку через раціональне використання енергетичних ресурсів.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ У БАРАБАННОМУ КОТЛІ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Фізичні та термодинамічні основи процесу горіння в барабанному котлі

Процес горіння в барабанному котлі є складним фізико-хімічним явищем, у якому відбувається перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію, яка далі трансформується в енергію пари для забезпечення технологічних або енергетичних потреб. Фундаментом цього процесу є реакції окиснення вуглецевмісних органічних речовин, які за наявності окисника (зазвичай повітря) супроводжуються виділенням великої кількості тепла. У випадку використання традиційних видів палива — природного газу, мазуту або вугілля — основними реагентами виступають вуглець, водень і сірка, які згоряють у присутності кисню з утворенням діоксиду вуглецю, водяної пари, сірчаных оксидів та інших сполук.

З термодинамічної точки зору, горіння є процесом, що відбувається з виділенням теплоти, тобто екзотермічним. Умови, за яких він реалізується в барабанному котлі, характеризуються значними температурними градієнтами, інтенсивним теплообміном і високим тиском робочого середовища. Ці фактори зумовлюють необхідність врахування специфіки фазових переходів та властивостей речовин, які беруть участь у процесі тепло- та масообміну. Зокрема, теплопередача від продуктів згоряння до теплоносія відбувається за рахунок випромінювання, конвекції й теплопровідності, причому частка кожного з механізмів залежить від просторової конфігурації топки, температурного поля та властивостей матеріалів конструктивних елементів.

У межах топки барабанного котла реалізується основна частина реакцій згоряння. Це середовище характеризується надвисокими температурами, які можуть досягати 1300–1600 °С залежно від виду палива та режиму подачі повітря. За таких умов важливого значення набуває ступінь диспергування палива, його попередній стан (газоподібний, рідкий чи твердий) та інтенсивність

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

змішування з окисником. У газоподібному середовищі з високою температурою відбувається не лише повне згоряння, але й формування ряду проміжних радикалів, які беруть участь у ланцюгових реакціях, що обумовлюють динаміку процесу. Саме тому горіння не є миттєвим актом, а розгортається у часі й просторі залежно від температури, тиску, концентрації реагентів і характеру турбулентності потоку.

Особливістю барабанного котла є те, що він реалізує процес не лише згоряння палива, а й перетворення отриманої теплоти у фазову енергію пари. Водяний контур котла, зокрема екранні труби топки, економайзер і пароперегрівачі, є середовищем, у якому відбувається поглинання теплоти з подальшим кипінням води, утворенням насиченої пари та її перегрівом до параметрів, що відповідають умовам роботи турбін або технологічного обладнання. У барабані, який є центральною частиною гідравлічного контуру, здійснюється розподіл фаз: суміш пари і води, що надходить з контурів циркуляції, проходить сепарацію, внаслідок чого відокремлюється пара, що подається до пароперегрівача, та вода, яка повертається у циркуляційний контур.

Усі ці процеси підпорядковуються законам термодинаміки, зокрема рівнянням збереження маси, енергії та імпульсу. Основою теплотехнічного аналізу є перше начало термодинаміки, яке дозволяє кількісно визначити кількість теплоти, необхідної для нагрівання, кипіння та перегріву води. Друге начало визначає обмеження щодо можливості перетворення теплової енергії в механічну, а також вплив ентропії на ефективність процесу.

З точки зору керування, значущими є фазові переходи води в пар, які відбуваються в умовах високого тиску. Для сучасних барабанних котлів характерні параметри тиску пари понад 10–13 МПа, що змінює термодинамічні характеристики середовища і потребує точного регулювання температурного поля для уникнення локального перегріву чи недостатнього випаровування. Крім того, у таких умовах зростає значення теплофізичних властивостей води й пари — питомої теплоємності, густини, теплопровідності — які відіграють провідну

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

роль у розрахунках теплових потоків і оптимізації режимів роботи котла.

1.2 Загальна технологічна схема котельної установки, яка працює на твердому паливі

Загальна технологічна схема котельної установки, яка працює на твердому паливі, ілюструє комплексний процес підготовки, транспортування, подрібнення та спалювання палива, а також подальшого використання теплової енергії для виробництва пари. На основі опису і рис. 1.1 можна детально розглянути кожний етап технологічного процесу, розкриваючи його функціональне значення та взаємозв'язки між складовими.

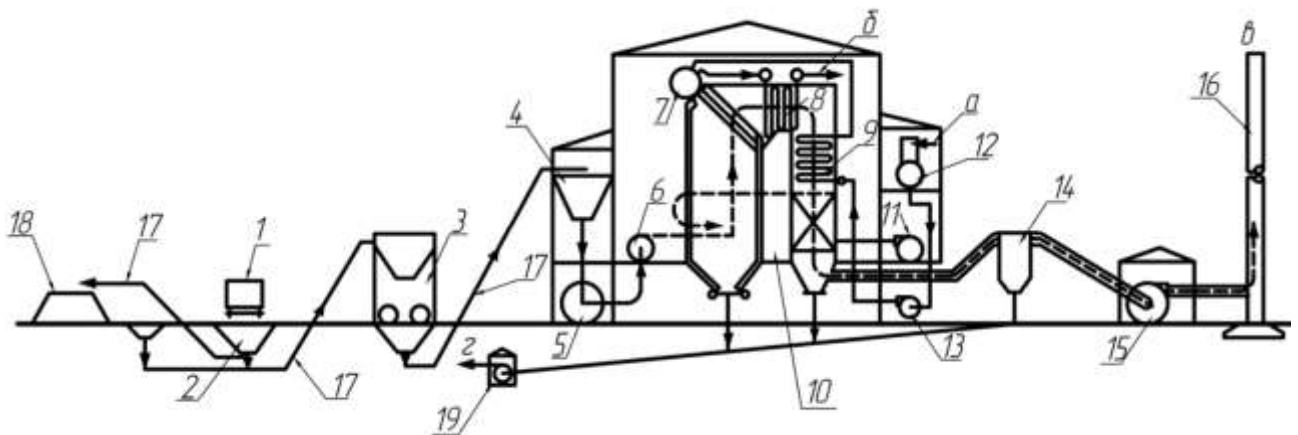


Рисунок 1.1 – Загальна технологічна схема котельної установки, яка працює на твердому паливі: 1 – вагон з паливом; 2 – бункер розвантажувального пристрою; 3 – дробильний блок; 4 – бункер котла для сирого палива; 5 – млин для розмелу палива; 6 – ексгаустер; 7 – барабан котла; 8 – пароперегрівник; 9 – водяний економайзер; 10 - повітропідігрівник; 11 – вентилятор; 12 – деаератор; 13 – живильний насос; 14 – золовловлювач; 15 – димосос; 16 – димова труба; 17 – стрічковий транспортер; 18 – штабель вугілля; 19 – багерна насосна система золовидалення; а – живильна вода; б – перегріта пара; в – продукти згоряння; г – шлак і зола

Початковим елементом системи є вагон з паливом (позначений як 1),

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

звідки тверде паливо завантажується у бункер розвантажувального пристрою (2). Цей бункер виконує функцію накопичення і дозованого подавання палива далі по технологічному ланцюгу. Паливо з бункера транспортується стрічковим транспортером (17) у дробильний блок (3), призначений для механічного подрібнення великих шматків палива. Мета дроблення полягає в тому, щоб розмір часток палива був зменшений приблизно до одного міліметра, що сприяє більш ефективному згорянню та покращенню тепловіддачі.

Після первинного дроблення паливо знову подається стрічковим транспортером (17) у бункер котла для сирого палива (4). Цей етап служить проміжним накопичувачем, що забезпечує безперервність подачі палива до наступного вузла — млина (5). У млині паливо додатково подрібнюється до дуже дрібних часток розміром у десятки та сотні мікрометрів, що вже відповідає параметрам вугільного пилу. Така дисперсність є необхідною для забезпечення рівномірного і швидкого згорання у котлі.

Вугільний пил після млина 5 подається далі у зону горіння — барабан котла (7), де відбувається процес горіння, що супроводжується виділенням теплової енергії. В цей же час, теплові потоки передають тепло через різні теплообмінні апарати, серед яких пароперегрівник (8), водяний економайзер (9) і повітропідігрівник (10). Ці пристрої забезпечують підвищення ефективності теплового циклу: пароперегрівник підвищує температуру пари, економайзер використовується для підігріву живильної води, а повітропідігрівник — для нагріву повітря, що подається в камеру згорання.

Подачу повітря для горіння регулює вентилятор (11), який забезпечує необхідний об'єм кисню, а також сприяє виведенню продуктів згорання через димосос (15) та димову трубу (16). Для очищення газів від золи та шлаків у системі передбачено зололовлювач (14) та багерну насосну систему золовидалення (19), які утримують тверді частки, що утворюються при горінні, запобігаючи їх потраплянню у навколишнє середовище [1].

Живильна вода (а) подається до котла через деаератор (12), де з неї

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

видаляються розчинені гази, і живильний насос (13), який підтримує необхідний тиск у системі. У результаті утворюється перегріта пара (б), яка використовується для подальших технологічних або енергетичних процесів.

1.3 Особливості процесу утворення пари в барабанних котлах із природною та примусовою циркуляцією

Генерація водяної пари в парових котлах барабанного типу з природною циркуляцією базується на використанні термогідравлічного ефекту, що виникає внаслідок різниці густин рідкої води та пароводяної суміші. У такій конструкції рух теплоносія по циркуляційному контуру не потребує зовнішнього джерела енергії, оскільки він здійснюється самочинно під дією гравітаційних сил і зміни щільності середовища в опускних і підйомних трубах. Це дозволяє забезпечити безперервне функціонування парогенератора з мінімальними витратами на перекачування середовища.

На рис. 1.2 представлено технологічну схему барабанного котла з природною циркуляцією, виконаного за П-подібною компоновкою. Живильна вода (позиція 9), яка подається до установки через відповідний трубопровід, спочатку потрапляє в економайзер — теплообмінник, розміщений у конвективному газоході (8), де її температура підвищується за рахунок залишкового тепла димових газів. Далі нагріта вода надходить у барабан (4), який є центральною гідравлічною ланкою контуру циркуляції. Барабан з'єднаний одночасно з опускними трубами (5), які не піддаються прямому нагріванню, та з підйомними трубками топкових екранів (3), які розташовані у зоні топки (2), де відбувається інтенсивне згоряння палива, поданого через пальники (1).

У процесі циркуляції нагріта вода з барабана опускається через вертикальні опускні труби (5) до нижніх колекторів (11), розміщених біля основи топки. Звідти рідина спрямовується до трубок екрану топки (3), де під впливом теплового випромінювання і конвекції від продуктів згоряння палива

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

випарювання, є паросатурація — частка пари у загальному об'ємі пароводяної суміші. Її оберненою величиною є кратність циркуляції (К) — співвідношення масової витрати води, що циркулює в контурі, до масової витрати пари, що утворюється. Для забезпечення термостабільності та недопущення перегріву стінок труб циркуляція повинна бути достатньо інтенсивною, з переважанням рідкої фази.

1.4 Особливості тепломасообміну у процесі горіння та утворення пари

У процесі горіння в барабанному котлі відбувається складна взаємодія між тепло- та масообмінними явищами, які зумовлюють ефективність перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію теплоносія. Центральним аспектом є передача тепла від гарячих продуктів згорання до води, яка циркулює у трубчастих системах парогенераційного контуру. Цей обмін здійснюється через поверхні нагріву, які поділяються на радіаційні (екрани топки) і конвективні (економайзери, пароперегрівники), що діють у різних температурно-динамічних зонах котла.

У топковій частині, де температура може досягати 1600–2000 °С, домінує променевий теплообмін. Завдяки високій інтенсивності випромінювання полум'я передає енергію трубчастим екранам, усередині яких знаходиться вода або пароводяна суміш. При цьому тепловий потік спрямований переважно у вигляді електромагнітного випромінювання, інтенсивність якого визначається законом Стефана-Больцмана і прямо залежить від четвертого степеня абсолютної температури джерела.

Після часткового випаровування води в топкових трубах, суміш потрапляє у барабан, де відбувається гравітаційна сепарація фаз. У процесі сепарації важливу роль відіграє масообмін, зумовлений розділенням рідкої і парової фаз на мікрорівні. Пара, що відділилась, подається в пароперегрівач, де відбувається подальше підвищення її температури до перегрітого стану. Саме на цьому етапі формується якість пари як енергоносія — перегріта пара характеризується

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

низькою густиною, високою температурою та відсутністю краплинної фази, що забезпечує високий ентальпійний потенціал.

Конвективна частина котла, де температура газів знижується до 400–600 °С, забезпечує менш інтенсивний, проте триваліший контакт між теплоносієм і теплообмінними поверхнями. Тут домінує теплопровідність і конвекція, а ефективність передачі тепла визначається градієнтом температур між газовим середовищем та теплоносієм, а також ступенем турбулентності потоку.

Масообмінні явища особливо помітні на фазових межах у пароутворюючій зоні. У трубах, де відбувається кипіння, на внутрішній поверхні формується плівка парових бульбашок, що тимчасово знижує теплопередачу до моменту їх відриву. Така динаміка викликає періодичні зміни локального температурного поля й вимагає точного обліку у моделюванні процесу. У разі порушення рівноваги між теплопідводом і тепловідводом може виникати паровий прорив, що порушує циркуляційний контур та може викликати теплові напруження.

1.5 Нелінійності та інерційність процесів як фактори, що ускладнюють автоматизацію

Процес горіння в барабанному котлі, як об'єкт автоматизованого регулювання, вирізняється складною фізичною природою, що виявляється у його істотній нелінійності та інерційності. Ці властивості зумовлюють багатофакторний характер динаміки системи, яка суттєво ускладнює реалізацію ефективного керування за допомогою класичних методів автоматичного регулювання. Аналіз природи цих факторів є необхідною передумовою для побудови адекватної стратегії контролю, яка враховує внутрішні особливості об'єкта.

Нелінійність системи проявляється на всіх етапах перетворення енергії – від подачі палива до утворення перегрітої пари. Вона зумовлена, зокрема, залежністю теплотворної здатності палива від його фізико-хімічного складу, що

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

змінюється у часі; варіативністю коефіцієнтів теплопередачі залежно від температурних градієнтів та режиму протікання потоку; а також нелінійними характеристиками обладнання (наприклад, клапанів подачі повітря чи регуляторів тиску). Особливо істотною є залежність реакції котельної установки від режимів горіння: навіть незначне відхилення від стехіометричного співвідношення паливо–повітря призводить до диспропорції у тепловиділенні, що впливає на температуру, паровий тиск і ступінь насиченості пари.

Інерційність системи має переважно теплотехнічне походження. Значна теплоємність металоконструкцій котла та наявність багатоступеневого масообмінного середовища створюють тривалий часовий лаг між зміною вхідного впливу (наприклад, збільшення подачі палива) і відповідною реакцією вихідного параметра (наприклад, підвищенням температури перегрітої пари). Це зумовлює знижену швидкодію системи, особливо при великих об'ємах води і пари, які виступають в ролі акумуляторів теплоти. Крім того, існують додаткові структурні запізнення, пов'язані з часом проходження робочого тіла через трубчасті контури.

Запізнення у відповідях системи на збурення, як зовнішні (зміна навантаження, коливання тиску у зовнішній мережі), так і внутрішні (флуктуації параметрів горіння, варіації у складі повітряного потоку), створює загрозу виникнення автоколивань та зниження стійкості системи при спробі застосування традиційних ПД-регуляторів. Особливо це проявляється у режимах часткового навантаження, коли система стає особливо чутливою до неузгодженості керувальних дій.

Вказані особливості обґрунтовують необхідність впровадження адаптивних або прогнозуючих алгоритмів керування, які здатні враховувати змінність параметрів об'єкта у реальному часі. Доцільним є застосування моделей з елементами самоналаштування, що дозволяють оцінювати змінні коефіцієнти тепловіддачі, опору та продуктивності окремих ланок. Прогнозуючі стратегії, зокрема на основі моделі прогнозованого керування (Model Predictive

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Control), дозволяють формувати керуючі дії на основі оцінки майбутнього стану системи, що особливо важливо в умовах запізнень і тривалої теплової інерції.

1.6 Взаємозв'язки між основними параметрами процесу в котельній установці, що працює на твердому паливі

Функціонування котельної установки на твердому паливі є результатом складної взаємодії між температурним режимом, витратою палива, об'ємом поданого повітря та рівнем створеної тяги. Ці параметри не є ізольованими — їх зв'язок характеризується як статичними, так і динамічними залежностями, що визначають реакцію системи на зміни зовнішніх або внутрішніх впливів. Розуміння цієї взаємозалежності дозволяє підвищити ефективність роботи установки, забезпечити стабільність теплових режимів і зменшити втрати енергії через неповне згоряння або надлишкові продукти горіння.

Температурний режим в топковій камері визначається не лише теплотворною здатністю палива, а й умовами його згоряння, які формуються внаслідок співвідношення між кількістю палива та поданого повітря. Якщо витрата палива перевищує здатність системи забезпечити його повне окиснення, відбувається зниження температури горіння та утворення недоокиснених продуктів — таких, як оксид вуглецю або вуглеводневі залишки. Надлишкове повітря, у свою чергу, знижує температуру зони горіння через ефект теплового розбавлення, оскільки не бере безпосередньої участі в реакції і лише відбирає частину теплової енергії. Це спричиняє зниження ефективності теплопередачі в парогенераторі та може призвести до локального зниження температури нижче температури займання, що також негативно впливає на повноту згоряння.

Динаміка процесу залежить не лише від миттєвих змін параметрів, а й від інерційності системи, пов'язаної з акумулюючою здатністю котла, тепловими ємностями трубопроводів та затримками у подачі палива й повітря. Такі часові зсуви призводять до складних коливальних процесів у разі змін навантаження, що вимагає ретельного узгодження витрати палива з подачею повітря та

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

регулювання тиску в димовому тракті через зміну тяги. Підвищення тяги сприяє інтенсифікації видалення продуктів згоряння, що у певних умовах може поглиблювати дефіцит кисню в зоні горіння. Водночас надмірна тяга призводить до додаткових теплових втрат із димовими газами, оскільки виводить значну частину теплової енергії до атмосфери до того, як вона встигає передатися теплоносієві.

Співвідношення між витратою повітря та кількістю палива формує основу термохімічної рівноваги процесу горіння. Його зміщення в бік нестачі кисню сприяє формуванню частково окиснених продуктів і утворенню твердих залишків. Навпаки, надлишок повітря збільшує об'єм газів, що проходять через топку, але не беруть участі в окисних реакціях, внаслідок чого зростають втрати теплоти з вихлопними газами. Таким чином, співвідношення повітря-паливо безпосередньо впливає як на термодинамічну повноту горіння, так і на теплотехнічні характеристики системи.

Рівень теплових втрат у котельній установці визначається не лише хімічною неповнотою згоряння, а й фізичними втратами з недоспаленими речовинами, що виносяться потоком димових газів. Ці втрати прямо корелюють зі ступенем змішування палива і повітря, а також з рівномірністю температурного поля в топковому об'ємі. У разі нерівномірного розподілу температури можуть виникати зони з недостатньою температурою для повного окиснення, навіть за наявності достатньої кількості кисню.

Загальна ефективність котельної установки, яку кількісно виражають через енергетичний коефіцієнт корисної дії, є похідною від оптимального балансу між витратою палива, подачею повітря, температурним режимом та тяговим перепадом у димовому тракті. Порушення цього балансу в будь-якому з напрямків призводить до суттєвого зниження ККД, накопичення продуктів неповного згоряння, підвищення викидів забруднюючих речовин та зростання експлуатаційних витрат.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

1.7 Взаємозв'язки між основними параметрами процесу у котельній установці, що працює на твердому паливі

У контексті теплотехнічних процесів, що реалізуються у котельних установках, значення набуває вивчення взаємозв'язків між такими змінними, як температура зони горіння, витрата палива, подача повітря та рівень тяги. Ці параметри не лише взаємопов'язані у рамках енергетичного балансу, а й формують складну систему з динамічними та статичними характеристиками, що відображають чутливість процесу до збурень та ефективність регулювання.

Температурне поле в топковому просторі зумовлюється не стільки абсолютним значенням теплотворної здатності палива, скільки якістю його згорання, яка, у свою чергу, залежить від точно витриманого співвідношення між подачею палива та повітря. Якщо повітря надходить у недостатній кількості, процес окиснення стає неповним, внаслідок чого утворюються такі небажані продукти, як оксид вуглецю або органічні залишки, що свідчить про хімічну неповноту горіння. Водночас, надлишкове повітря розбавляє реакційний об'єм, знижує температуру горіння і призводить до зростання втрат з димовими газами, що безпосередньо впливає на енергетичний коефіцієнт корисної дії.

Динамічна взаємодія між витратою палива і повітря є чутливою до інерційності системи подачі, що включає затримки на транспортування, розмел, сушіння палива та адаптацію системи повітророзподілу. Унаслідок цього, зміни у навантаженні котла не одразу реалізуються у вигляді нового температурного режиму, що створює умови для виникнення осциляцій і перехідних процесів, які потребують активного втручання систем автоматичного регулювання. У цьому аспекті важливо враховувати реакцію на збурення, такі як раптове зниження тиску в повітряному тракті або коливання якості палива, які викликають зміну калорійності та вологовмісту.

Рівень тяги у димовому каналі визначає не лише інтенсивність видалення продуктів згорання, а й створює умови для стабільного протікання процесу горіння. Надлишкова тяга може призводити до часткового винесення твердих

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

частинок незгорілого палива, що збільшує втрати з недоспаленими речовинами. Низька тяга ж обмежує подачу вторинного повітря у верхню частину топки, ускладнюючи окиснення летких компонентів. Отже, стабільна тяга є умовою підтримання рівномірного температурного поля та контролю тривалості перебування палива у зоні горіння (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Взаємозв'язки між основними параметрами процесу

Параметр	Тип впливу	Характер взаємозв'язку	Можливі наслідки відхилень	Вплив на повноту згоряння та ККД
Температура в топці	Керована / залежна	Залежить від теплотворної здатності палива, витрати повітря та інтенсивності тяги	Зниження – утворення продуктів неповного згоряння, підвищення – локальні перегриви	Недостатня температура → неповне згоряння; оптимальна температура → високий ККД
Витрата палива	Керована	Впливає на теплове навантаження та потребу в кисні	Надлишкова витрата без достатнього повітря → утворення CO, зола	Порушення балансу повітря-паливо → втрати з недоспаленим паливом
Подача повітря	Керована / збурювальна	Визначає інтенсивність окиснення палива; має оптимум	Недостатня подача → утворення чадного газу; надлишок → теплові втрати з димовими газами	Відхилення в обидва боки знижують повноту згоряння та ККД
Тяга (розрідження)	Керована / збурювальна	Забезпечує відведення продуктів згоряння, впливає на об'єм повітря	Надлишкова тяга → охолодження топки, втрати з димовими газами; недостатня → задимлення	Занадто сильна тяга знижує температуру горіння, зменшує ККД
Співвідношення повітря-паливо	Похідне	Зумовлює термохімічні умови згоряння	Невідповідність стехіометричному значенню → втрати енергії, утворення шкідливих викидів	Оптимальне співвідношення забезпечує максимальний ККД та повноту згоряння

Співвідношення між подачею повітря і витратою палива є

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

фундаментальним фактором, що визначає ефективність перетворення хімічної енергії палива у теплову. Його відхилення у будь-який бік супроводжується як зниженням повноти згоряння, так і погіршенням екологічних показників. Недоокиснені залишки, які утворюються при дефіциті кисню, мають не лише токсичні характеристики, а й свідчать про втрати енергії. Надлишок кисню, не беручи участі у хімічних реакціях, відводиться з димовими газами, зменшуючи загальний тепловий потенціал системи. Саме тому підтримання оптимального співвідношення повітря-паливо вимагає постійного моніторингу, динамічного регулювання і адаптації до змін умов експлуатації.

Загальна ефективність роботи котла визначається, таким чином, не стільки індивідуальними значеннями параметрів, скільки їх інтегральною збалансованістю у режимах, що забезпечують повне згоряння, мінімальні втрати з недоспаленими речовинами та максимально можливий коефіцієнт перетворення теплової енергії у корисну. Будь-яке порушення цього балансу призводить до підвищення питомих витрат палива, зростання викидів шкідливих речовин і деградації експлуатаційних характеристик системи. У зв'язку з цим, науково обґрунтований аналіз взаємозв'язків між параметрами горіння є необхідною умовою для проектування ефективних та надійних систем керування теплотехнічними процесами.

1.8 Аналіз системи автоматичного регулювання барабанних котлів

Сучасні підходи до автоматизованого регулювання теплового навантаження парових котлів, а також тиску пари в паропроводі, ґрунтуються на принципах дії, що враховують відхилення контрольованих параметрів та дію збурювальних впливів. Такі системи реалізуються у вигляді комбінованих структур, характер і функціональність яких визначаються конкретним режимом експлуатації котла та схемою підключення трубопроводів перегрітої пари до турбіни.

Конструктивні особливості барабанних котлів дозволяють реалізовувати

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

багатовимірні схеми регулювання, які можуть бути структурно поділені на відносно автономні підсистеми. Зокрема, можливо виокремити незалежні регуляторні контури, які забезпечують оптимізацію процесів горіння палива, стабілізацію рівня води в барабані та підтримання температури перегрітої пари в заданих межах. Такий підхід підвищує керованість системи загалом і дозволяє точніше реагувати на зміни зовнішніх умов.

При розгляді системи автоматичного регулювання навантаження барабанного котла варто підкреслити, що головним завданням є забезпечення мінімальних відхилень регульованих величин від їх заданих значень. Підвищення ефективності регулювання часто досягається за рахунок зростання чутливості регулятора до відхилення контрольованого параметра. Проте надмірне збільшення цього показника може спричинити виникнення автоколивань у замкненому контурі та призвести до втрати стійкості системи.

Процеси регулювання теплового навантаження передбачають узгоджене керування витратами палива та живильної води, оскільки параметри тиску та температури перегрітої пари безпосередньо залежать від їхнього співвідношення. Водночас температурний режим не може бути розглянутий як самостійна функція, оскільки він визначається балансом між витратою палива та води, а отже, потребує багатфакторного регулювання з урахуванням збурень. Для визначення фактичного значення теплового навантаження зазвичай використовується вимірювання витрат палива та живильної води.

Структура регуляторної системи теплового навантаження барабанного котла представлена на рис. 1.3. Ця система працює на основі співвідношення між кількістю поданого палива та отриманою тепловою енергією. Підтримання теплового навантаження здійснюється шляхом регулювання подачі палива, у той час як температурний режим контролюється за допомогою регулятора живлення.

Окреме місце в системі автоматичного регулювання посідає задача забезпечення економічності процесу горіння в топці барабанного котла. Ця задача невід'ємно пов'язана з прагненням до мінімізації витрат палива, що є

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Внутрішня контурна лінія містить у собі самодіючий регулятор подачі повітря, що взаємодіє з об'єктом регулювання, функціональну суть якого можна зобразити спрощеною схемою залежності між параметрами пари та повітря. Ця ділянка забезпечує безпосереднє коригування співвідношення компонентів горючої суміші, реагуючи на локальні зміни в системі. Такий підхід спрямований на швидке підтримання стабільності горіння на основі зворотного зв'язку за поточними параметрами процесу.

Зовнішній регуляторний контур виконує функцію оцінювання економічності горіння за допомогою пристроїв, що реалізують розрахунок показника ефективності на основі вхідних сигналів. Система формування прогнозу показника економічності функціонує із залученням інформації про необхідну потужність, яка має бути реалізована в топковому просторі, а також параметрів, що характеризують подачу палива. Це забезпечує не лише оцінку, але й аналітичне передбачення ефективності поточного процесу згоряння. Як варіант технічної реалізації, величина вихідної потужності, зумовлена подачею палива, може бути виміряна або апроксимована засобами діагностики котлоагрегату [2].

Необхідність застосування таких комплексних схем регулювання зумовлюється особливостями функціонування сучасних парових котлів високого тиску. Зокрема, у динамічних умовах експлуатації можливі раптові зміни в роботі турбінного регулятора, який у певний момент відкриває паровий клапан, що призводить до різкого зростання витрати перегрітої пари з котла в напрямку турбіни. Це мало б спричинити зниження рівня води у барабані, однак на практиці спостерігається початкове швидке зростання рівня, після чого відбувається поступове наближення до стабільного значення.

Подібна поведінка системи пояснюється складною структурою фазового стану теплоносія в барабані та трубах екрану котла, де замість однорідної рідини перебуває пароводяна суміш, об'єм якої є функцією тиску. Отже, збільшення ступеня відкриття турбінного клапана миттєво спричиняє зниження тиску, що

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

сприятливими динамічними властивостями, що дозволяє реалізувати її у вигляді одноконтурного контуру з безпосереднім зворотним зв'язком. Регулятор розрідження здійснює обробку сигналу, отриманого із верхньої частини топки, де вимірюється рівень розрідження. У відповідь на зміну цього параметра система змінює положення напрямних апаратів димососів, що забезпечує оперативне компенсування впливу порушень і підтримання розрідження на заданому рівні.

Оскільки витрата повітря, що регулюється системою забезпечення якості горіння палива, безпосередньо впливає на розрідження в топці, виникає потреба у нейтралізації цієї взаємозалежності. Для усунення впливу регулятора подачі повітря на стабільність розрідження, регулюючий вплив цього регулятора подається не лише на виконавчий механізм вентилятора, але й паралельно на його вхід, попередньо модифікований за допомогою спеціального блоку компенсації збурень. Такий підхід забезпечує динамічну симетрію між збуренням і компенсаційною реакцією системи.

У випадку зміни положення напрямних апаратів вентилятора, система миттєво формує відповідний коригувальний сигнал, який спрямовується до димососів. Це забезпечує збереження розрідження на стабільному рівні незалежно від змін, спричинених іншими підсистемами. Таким чином, забезпечується ізоляція заданого сигналу від можливих викривлень, що підтримує цілісність функціонування системи навіть за умов нестабільного навантаження або змін у зовнішніх умовах експлуатації.

Висновки до розділу

У межах даного розділу було здійснено всебічний аналіз структурної організації та функціонування котельної установки, яка працює на твердому паливі, з акцентом на вивчення її технологічної схеми, взаємозв'язків між основними параметрами процесу горіння та закономірностей, що визначають енергетичну ефективність системи. Детально розглянуто послідовність обробки

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

палива – від моменту його надходження у вигляді сировини до формування вугільного пилу, який у подрібненому стані надходить у зону згоряння. Така схема забезпечує підвищену реакційну здатність палива та сприяє стабілізації теплового режиму.

Проаналізовано роль кожного з елементів системи – від млина до пароперегрівника, водяного економайзера та повітропідігрівника – з огляду на їхній внесок у реалізацію процесу теплопередачі, формування температурного поля та підвищення коефіцієнта корисної дії. Розглянуто характерні динамічні та статичні зв'язки між витратою палива, температурою, подачею повітря і рівнем тяги, які визначають гнучкість та стійкість роботи системи в умовах змін навантаження або якості палива.

Особливу увагу було приділено співвідношенню повітря до палива як визначальному фактору, що впливає на повноту згоряння, утворення шкідливих залишків та рівень втрат з недоспаленими речовинами. Встановлено, що лише за умов оптимального балансу між киснем і горючими компонентами забезпечується повнота окиснення та мінімізація теплових втрат. Водночас системи автоматичного регулювання повинні враховувати інерційність і збурювальні впливи для забезпечення стабільної роботи котла у перехідних режимах.

Таким чином, комплексне розуміння технологічної структури котельної установки, а також динаміки взаємозалежностей між керованими та збурювальними змінними є необхідною умовою для підвищення енергоефективності, надійності та екологічної безпечності функціонування теплотехнічної системи.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Опис системи автоматичного регулювання барабанних котлів

Барабанний котел являє собою складну багатозв'язну систему, в якій тісно переплетені вхідні та вихідні параметри, що взаємодіють у межах єдиного теплотехнологічного середовища. Взаємозалежності між цими параметрами обумовлюють динамічний характер роботи котла та потребують ретельного аналізу для забезпечення його ефективного функціонування. Зображення структурних зв'язків між основними технологічними величинами представлено на рис. 2.1, що ілюструє природу взаємовпливів та рівень складності об'єкта регулювання.

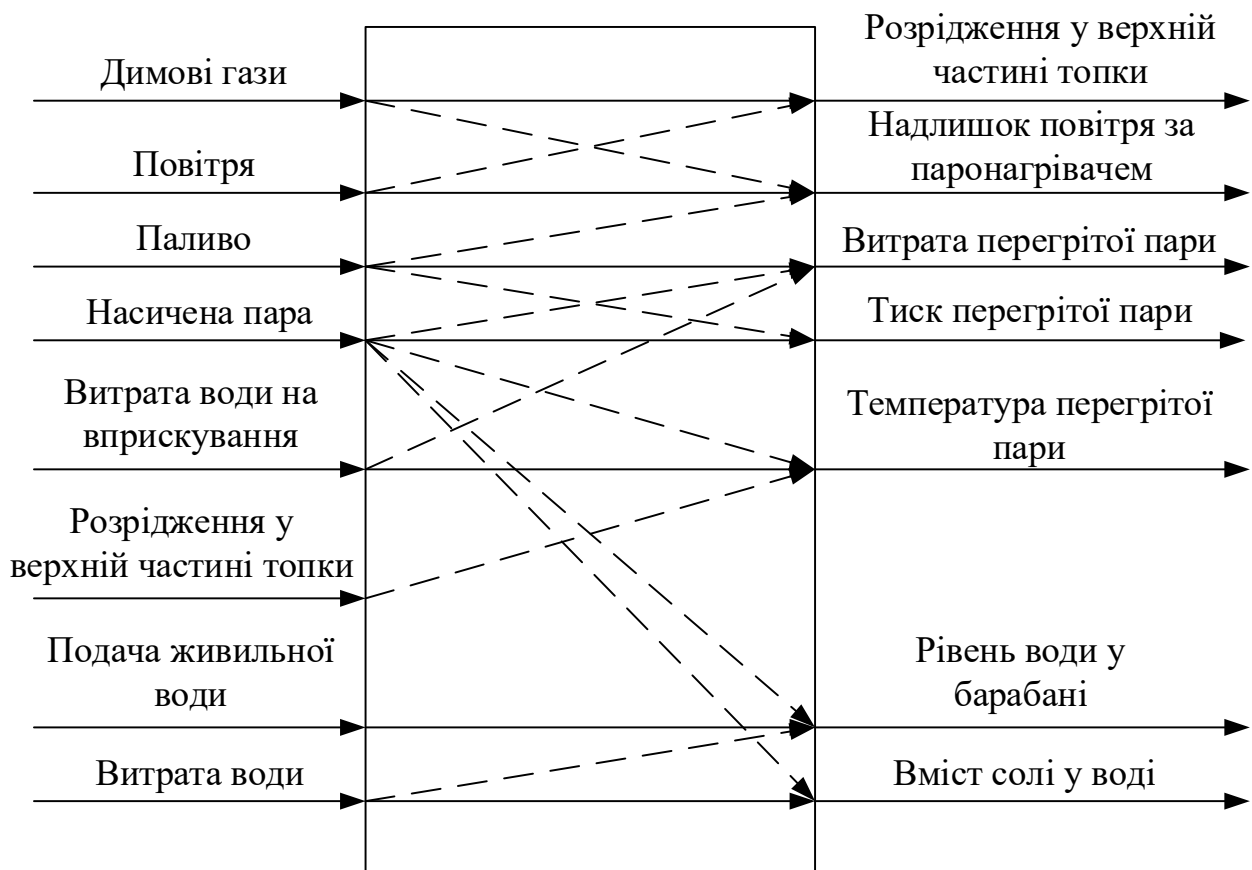


Рисунок 2.1 – Взаємозв'язки вхідних та вихідних параметрів у барабанному котлі

Функціонування барабанного котла значною мірою залежить від

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

автоматизованих систем керування, які забезпечують стабілізацію основних режимних параметрів. До таких параметрів належать витрати палива, тиск пари в паропроводі, подача повітря, температура перегрітої пари та витрата живильної води. Регулювання здійснюється за допомогою систем, що використовують принципи нечіткого моделювання, а також методи логічного висновування, що особливо актуально в умовах неповноти або нечіткості вхідних даних.

Окрему увагу в експлуатації котла слід приділяти водно-хімічному режиму, оскільки якість живильної води має безпосередній вплив на надійність і довговічність обладнання. Найважливішим індикатором хімічного стану води є концентрація солей. Перевищення допустимого рівня може спричинити перенесення солей у турбіну через пароперегрівник, що призводить до інтенсивного зносу обладнання. З іншого боку, недостатня кількість фосфатів у воді сприяє утворенню накипу на внутрішніх поверхнях труб, що провокує локальне перегрівання матеріалу і, як наслідок, механічні ушкодження.

Для стабілізації концентрації домішок у котловій воді застосовується система безперервної та періодичної продувки, яка здійснюється через спеціальні розширювальні пристрої, підключені до барабана. Під час цього процесу також усуваються осади, що накопичуються в нижніх колекторах. Безперервна продувка зазвичай реалізується за допомогою схем із постійним автоматичним регулюванням, тоді як параметри періодичної продувки визначаються оператором і виконуються технічним персоналом у рамках обхідного контролю обладнання.

Найбільш складним елементом управління в барабанному котлі є регулювання температури перегрітої пари. Її стабілізація ускладнюється тим, що на даний параметр одночасно впливають зміни витрати живильної води та кількості палива. Ці зміни викликають необхідність у коригуванні подачі води та інтенсивності впорскування, що потребує високої точності алгоритмів управління. Завдання регуляторів у такій системі охоплюють стабілізацію теплового навантаження, керування процесами згоряння, регулювання перегріву

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

пари та підтримання заданих температурних режимів у пароводяному тракті.

На відміну від барабанних котлів, у прямоточних парогенераторах автоматизовані системи керування забезпечують одночасне регулювання подачі палива та живильної води без необхідності регулювання сольового складу безпосередньо в межах котла. Саме тому завдання підтримання стабільного водно-хімічного режиму в барабанному котлі належить до розряду найскладніших для реалізації. Якість живильної води, своєю чергою, визначає не лише ефективність теплового процесу, а й тривалість експлуатаційного ресурсу обладнання між ремонтами.

2.2 Аналіз параметрів ефективної економії палива в барабанному котлі

Для ефективної економії палива в барабанному котлі важливо вибрати параметр, який найбільш чутливо й точно відображає якість процесу згоряння й дозволяє оперативно впливати на теплотехнічну ефективність. Такий параметр повинен одночасно сигналізувати про теплові втрати, відхилення від стехіометричного співвідношення паливо–повітря й можливе утворення шкідливих продуктів згоряння. Розгляньмо основні варіанти й проаналізуємо, який із них найбільш доцільно використовувати в основному контурі регулювання для економії палива.

Концентрація вуглекислого газу у димових газах є традиційним індикатором повноти згоряння, оскільки її зростання за умови незмінного теплонавантаження свідчить про підвищення термохімічної ефективності процесу. Однак цей параметр втрачає однозначність в умовах значних коливань навантаження або зміни складу палива. Водночас наявність чадного газу вказує на неповне окиснення вуглецевмісних компонентів, тому перевищення допустимої концентрації CO розглядається як ознака дефіциту кисню в зоні горіння або неефективного перемішування реагентів. Проте CO має виражену інерційність у вимірюванні та регулюванні, що знижує його придатність як

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

єдиного керованого показника в динамічних режимах [3].

Температура димових газів визначає ступінь теплових втрат через димову трубу, відтак її зменшення розглядається як спосіб підвищення коефіцієнта корисної дії котла. Але ця температура залежить не лише від параметрів горіння, а й від теплообміну у поверхнях нагріву, тому її використання в якості регульованої величини без урахування теплового балансу може призвести до помилкових керуючих дій. Концентрація надлишкового кисню, у свою чергу, відображає надлишковість повітря, що подається до зони горіння, і слугує узагальненим показником співвідношення паливо–повітря. Надлишок кисню свідчить про енергетичні втрати через нагрів невикористаного окисника, але його недолік створює умови для утворення токсичних газів і зменшує термодинамічну ефективність [4].

Таким чином, оптимізація процесу горіння не може бути досягнута на основі одного окремо взятого параметра, оскільки жоден з них не забезпечує повноцінної інформації про стан процесу в усій його складності. Комбінований підхід, що передбачає одночасне врахування концентрацій CO₂, CO, температури димових газів і рівня надлишкового кисню, дозволяє синтезувати цілісну картину режиму горіння. Такий підхід відкриває можливості для побудови мультикритеріальної системи автоматичного регулювання, в якій пріоритетність параметрів визначається як статичними умовами енерговикористання, так і поточними динамічними відхиленнями. У контексті підвищення ефективності паливовикористання саме комбіноване врахування згаданих показників є найадекватнішим засобом досягнення сталого теплотехнічного режиму з мінімальними втратами енергії та забрудненням довкілля.

У контексті автоматизованого управління теплотехнічними процесами в барабанному котлі доцільним є застосування каскадної архітектури системи регулювання, яка передбачає поділ завдань на два взаємопов'язані рівні. Такий підхід дозволяє реалізувати розмежування за динамікою впливу змінних параметрів та створює умови для ефективної компенсації збурень у процесі, який

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

характеризується високою інерційністю та багатофакторною зумовленістю.

Внутрішній контур, зорієнтований на підтримання заданого співвідношення витрат палива та повітря, виконує функцію оперативного стабілізатора процесу згоряння, реагуючи на короткотривалі відхилення і забезпечуючи стехіометричну відповідність в зоні горіння. Така організація дозволяє досягти балансу між подачею кисню та кількістю пального, не допускаючи енергетичних втрат через надлишковий нагрів невикористаного окисника, а також мінімізуючи ризик утворення токсичних недоокиснених компонентів. Фізичне спостереження за цим співвідношенням значно надійніше у порівнянні з прямим контролем за концентраціями продуктів згоряння, оскільки останній на сучасному етапі ускладнений низкою факторів.

Використання газоаналізаторів, які безпосередньо вимірюють концентрацію CO_2 або CO у димових газах, хоча і забезпечує високу чутливість до змін у процесі горіння, на практиці стикається з істотними труднощами. Зокрема, тривала експлуатація таких сенсорів у середовищі, насиченому агресивними продуктами згоряння та високотемпературним пилом, призводить до швидкого забруднення чутливих елементів, деградації їхніх характеристик та зниження достовірності отримуваної інформації. У промислових умовах це створює бар'єр для безперервного й довготривалого використання таких засобів у контурі регулювання. Таким чином, підхід, що ґрунтується на регулюванні витратних співвідношень як опосередкованого, але технологічно надійного параметра, виявляється більш практично прийнятним та стабільним [5].

Зовнішній контур, який формує керуючі дії на основі вимірюваної температури перегрітої пари, виконує функцію узагальненого регулятора теплотехнічного балансу. Оскільки температура перегрітої пари інтегрує в собі результати взаємодії численних параметрів – включаючи теплове навантаження, теплопередачу, витрати палива та води – саме вона виступає як об'єктивний критерій ефективності процесу. У цьому контексті каскадна структура дозволяє зовнішньому регулятору працювати з повільними коливаннями загальної

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

динаміки системи, тоді як внутрішній контур виконує функцію швидкої стабілізації проміжних змінних, створюючи умови для ефективного функціонування зовнішнього рівня.

2.3 Дослідження динаміки внутрішнього контуру (співвідношення витрат палива й повітря)

Вихідною точкою є створення умов, за яких можливо ізольовано спостерігати реакцію об'єкта на керуючі дії у вигляді зміни витрати палива або повітря за фіксованого навантаження.

Під час проведення експерименту на першому етапі здійснюється короткотривала зміна витрати палива (наприклад, східчасте зростання), при цьому витрата повітря утримується на постійному рівні. Фіксується відповідна зміна співвідношення «паливо/повітря», що вираховується за допомогою стандартних витратомірів. Після стабілізації процесу аналогічну дію проводять із повітряним каналом, утримуючи витрату палива сталою. У кожному випадку реєструються тимчасові характеристики реакції системи на збурення (рис. 2.2).

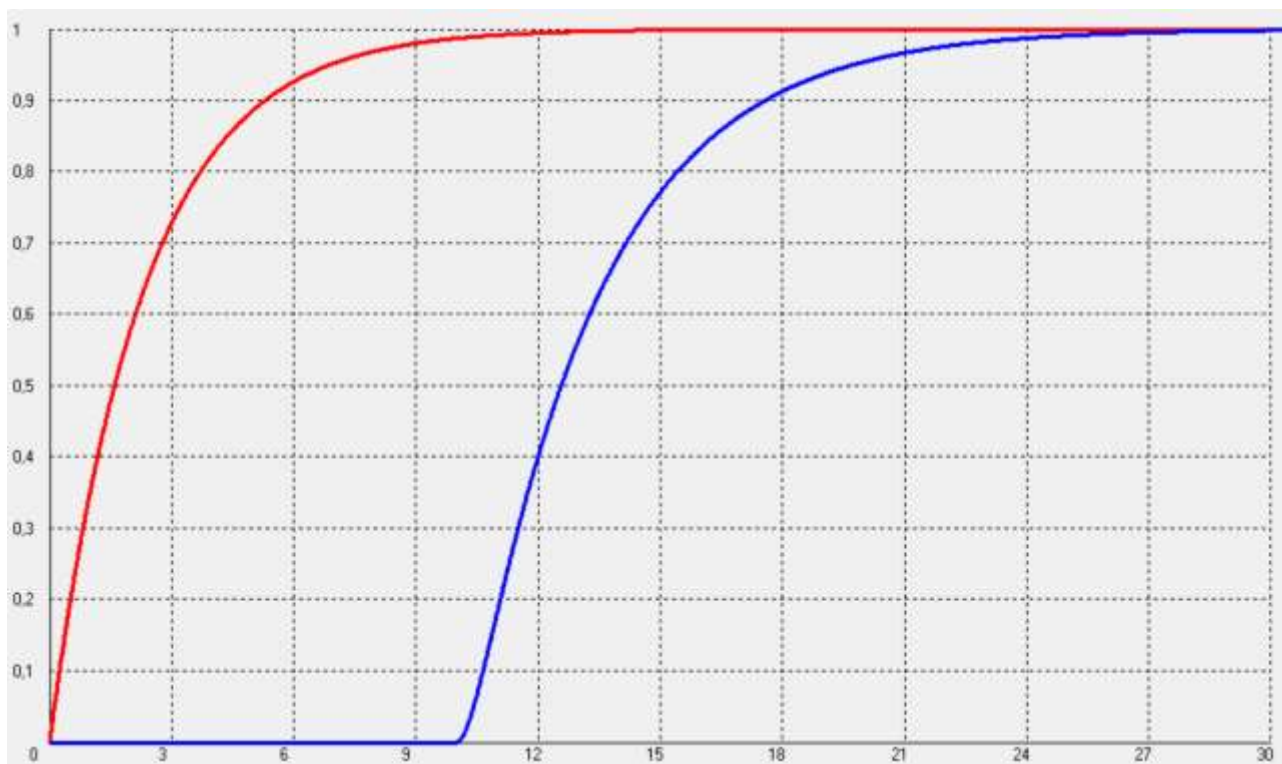


Рисунок 2.2 – Графіки перехідних характеристик ОК

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Важливо забезпечити такі умови, за яких інерційність об'єкта виявиться достатньою для моделювання його як аперіодичного ланцюга низького порядку. На основі отриманих перехідних характеристик (типу «східчаста дія – реакція системи») здійснюється апроксимація емпіричних кривих за допомогою стандартних функціональних форм (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Результати експериментальних досліджень на барабанному котлі переведені у безрозмірні одиниці

Час, с	Дія РО та ВМ	Витрата повітря, м ³ /год	Температура, °С
0	1	0	0
3	1	0,729	0
6	1	0,926	0
9	1	0,980	0
12	1	0,995	0,401
15	1	0,999	0,771
18	1	1,000	0,913
21	1	1,000	0,967
24	1	1,000	0,987
27	1	1,000	0,995
30	1	1,000	1,000

У результаті для внутрішнього контуру формується передавальна функція вигляду:

$$W_{\text{вн}}(p) = \frac{1}{T_2 p + 1} = \frac{1}{2.3p + 1}. \quad (2.1)$$

2.4 Дослідження динаміки зовнішнього контуру (температура перегрітої пари)

На другому етапі, маючи стабілізоване співвідношення паливо–повітря, що підтримується внутрішнім контуром, вводиться контрольоване збурення в теплове навантаження котла – наприклад, шляхом керованого збільшення витрати палива з автоматично відповідною зміною витрати повітря. Це збурення

в тепловому балансі призводить до зміни температури перегрітої пари на виході пароперегрівника, яка реєструється з використанням термоперетворювачів опору або термопар.

Реакція температури пари має бути зафіксована протягом усього перехідного процесу до моменту досягнення нової стаціонарної точки. Отримана експериментальна крива аналізується для встановлення її аперіодичного або коливального характеру. На практиці, за умов високої інерційності теплового обміну в пароводяному тракті, об'єкт часто адекватно описується моделлю другого порядку з запізненням.

Передавальна функція зовнішнього контуру має вигляд:

$$W_{\text{зов}}(p) = \frac{e^{-\tau p}}{T_1 p + 1} = \frac{e^{-10p}}{1.2p^2 + 3.5p + 1}, \quad (2.2)$$

Висновки до розділу

У цьому розділі здійснено комплексний аналіз системи автоматичного регулювання барабанного котла, що враховує складність взаємодії технологічних параметрів у межах єдиного теплотехнологічного процесу. Обґрунтовано необхідність застосування каскадної автоматичної системи регулювання, яка включає внутрішній контур для підтримання оптимального співвідношення витрат палива і повітря та зовнішній контур для регулювання температури перегрітої пари. Враховано практичні обмеження щодо використання безпосереднього контролю концентрацій CO_2 і CO через відсутність промислових датчиків і складності їх експлуатації в умовах забруднення продуктами горіння. Розроблено підхід до експериментального визначення динамічних характеристик об'єкта управління для подальшої побудови математичних моделей та передавальних функцій каскадної системи. Визначено методику вимірювання співвідношення витрат палива і повітря як основи для внутрішнього регулятора системи, що дозволяє реалізувати ефективне управління процесом горіння в умовах виробничої експлуатації.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

3 АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БАРАБАННОГО КОТЛА

3.1 Аналіз об'єктів керування

Каскадна система регулювання складається з двох контурів. Внутрішній контур співвідношення паливо-повітря характеризується передавальною функцією першого порядку $W_{\text{вн}}(p) = \frac{1}{2,3p + 1}$, що відповідає аперіодичній ланці з постійною часу $T_1 = 2,3$ секунди. Така динаміка притаманна швидкодіючим процесам регулювання витрати з обмеженою інерційністю виконавчих механізмів (рис. 3.1).

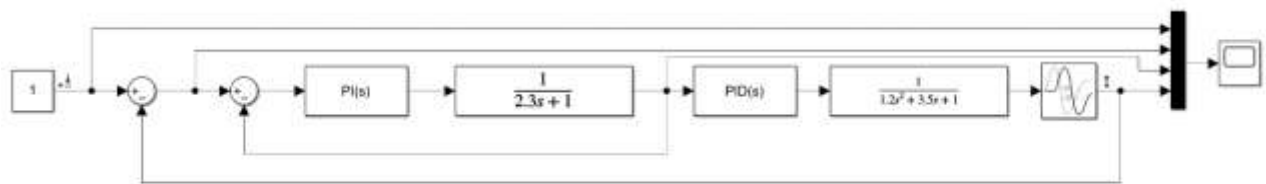


Рисунок 3.1 – Каскадна АСР барабанного котла

Зовнішній контур температури перегрітої пари описується складнішою передавальною функцією $W_{\text{зов}}(p) = \frac{e^{-10p}}{1,2p^2 + 3,5p + 1}$, яка поєднує коливальну ланку другого порядку з чистим запізненням $\tau = 10$ секунд. Характеристичне рівняння знаменника $1,2p^2 + 3,5p + 1 = 0$ має корені з від'ємними дійсними частинами, що забезпечує стійкість об'єкта. Коефіцієнт демпфування $\xi = 3,5/(2\sqrt{1,2}) \approx 1,59$ свідчить про аперіодичний характер перехідного процесу без перерегулювання.

Для внутрішнього контуру доцільно застосувати ПІ-регулятор з передавальною функцією:

$$W_{\text{р1}}(p) = K_{\text{п1}} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{і1}} \cdot p} \right) = \frac{K_{\text{п1}}(T_{\text{і1}} \cdot p + 1)}{T_{\text{і1}} \cdot p}. \quad (3.1)$$

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк. 40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Налаштування параметрів здійснюється за методом технічного оптимуму, який забезпечує максимальну швидкодію при збереженні стійкості.

Передавальна функція розімкненого внутрішнього контуру має вигляд:

$$W_{o1}(p) = W_{p1}(p) \cdot W_{вн}(p) = \left[\frac{K_{п1}(T_{i1} \cdot p + 1)}{T_{i1} \cdot p} \right] \cdot \left[\frac{1}{2,3p + 1} \right]. \quad (3.2)$$

Застосовуючи принцип технічного оптимуму, приймаємо $T_{i1} = T_1 = 2,3$ с для компенсації найбільшої постійної часу об'єкта. Тоді передавальна функція спрощується до: $W_{o1}(p) = \frac{K_{п1}}{T_{i1} \cdot p \cdot (2,3p + 1)} = \frac{K_{п1}}{2,3 \cdot p \cdot (2,3p + 1)}$.

Характеристичне рівняння замкненого контуру приймає форму:

$$2,3^2 p^2 + 2,3p + K_{п1} = 0. \quad (3.3)$$

Для забезпечення коефіцієнта демпфування $\xi = 0,707$ (оптимальне співвідношення між швидкодією та перегулюванням) розраховуємо пропорційний коефіцієнт: $K_{п1} = \frac{2,3^2}{4\xi^2} = \frac{5,29}{2} = 2,645$.

Остаточні параметри ПІ-регулятора внутрішнього контуру: $K_{п1} = 2,65$, $T_{i1} = 2,3$ с.

Зовнішній контур має складнішу структуру через наявність запізнення та коливальної динаміки. Еквівалентна передавальна функція внутрішнього контуру, налаштованого за технічним оптимумом, апроксимується інерційною ланкою першого порядку з постійною часу $T_e \approx 2T_1 = 4,6$ с.

Повна передавальна функція зовнішнього контуру включає еквівалент внутрішнього контуру та власну динаміку:

$$W_{екв}(p) = \left[\frac{1}{4,6p + 1} \right] \cdot \left[\frac{e^{-10p}}{1,2p^2 + 3,5p + 1} \right]. \quad (3.4)$$

Для компенсації запізнення та забезпечення стійкості застосовуємо ПІД-регулятор з передавальною функцією:

$$W_{p2}(p) = K_{п2} \left[1 + \frac{1}{T_{i2} \cdot p} + T_{д2} \cdot p \right] = K_{п2} \left[\frac{T_{i2} \cdot T_{д2} \cdot p^2 + T_{i2} \cdot p + 1}{T_{i2} \cdot p} \right]. \quad (3.5)$$

Налаштування здійснюється за модифікованим методом Циглера-Ніколса для систем із запізненням. Критичний коефіцієнт посилення визначається з умови граничної стійкості системи без регулятора інтегральної та

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

диференціальної складових.

Розраховуючи критичні параметри для об'єкта з домінуючим запізненням $\tau = 10$ с та еквівалентною постійною часу $T_e = 4,6$ с, отримуємо:

- відношення $\frac{\tau}{T_e} = \frac{10}{4,6} \approx 2,17$;
- критичний коефіцієнт $K_{кр} \approx \frac{0,45T_e}{\tau} = 0,45 \cdot \frac{4,6}{10} = 0,207$.

Параметри ПІД-регулятора за Циглером-Ніколсом:

- $K_{п2} = 0,6 \cdot K_{кр} = 0,6 \cdot 0,207 = 0,124$;
- $T_{i2} = 2\tau = 20$ с;
- $T_{d2} = 0,5\tau = 5$ с.

Чисельні значення параметрів регуляторів адаптовані для безпосереднього використання в блоках PID Controller середовища Simulink:

Внутрішній ПІ-регулятор:

- Proportional (P): 2.65;
- Integral (I): $2.65/2.3 = 1.152$;
- Derivative (D): 0;
- Filter coefficient (N): 100.

Зовнішній ПІД-регулятор:

- Proportional (P): 0.124;
- Integral (I): $0.124/20 = 0.0062$;
- Derivative (D): $0.124 \times 5 = 0.62$;
- Filter coefficient (N): 20.

Запізнення реалізується через блок Transport Delay з параметром 10 секунд. Передавальні функції об'єктів вводяться через блоки Transfer Function з відповідними коефіцієнтами чисельника та знаменника.

У середовищі Simulink блок PID Controller реалізує алгоритм пропорційно-інтегрально-диференційного регулювання, що забезпечує формування керуючого впливу на основі відхилення регульованої величини від заданого значення (рис. 3.2). Його робота ґрунтується на обчисленні зваженої суми пропорційної, інтегральної та диференційної складових, які формуються

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

залежно від параметрів, заданих у вікні налаштування блоку. Структура передбачає можливість вибору режиму дії, способу антисатурації та фільтрації похідної, що дозволяє адаптувати регулятор до характеристик об'єкта керування. Інтерфейс блоку підтримує автоматичне налаштування коефіцієнтів через середовище PID Tuner або шляхом введення вручну відповідних значень.

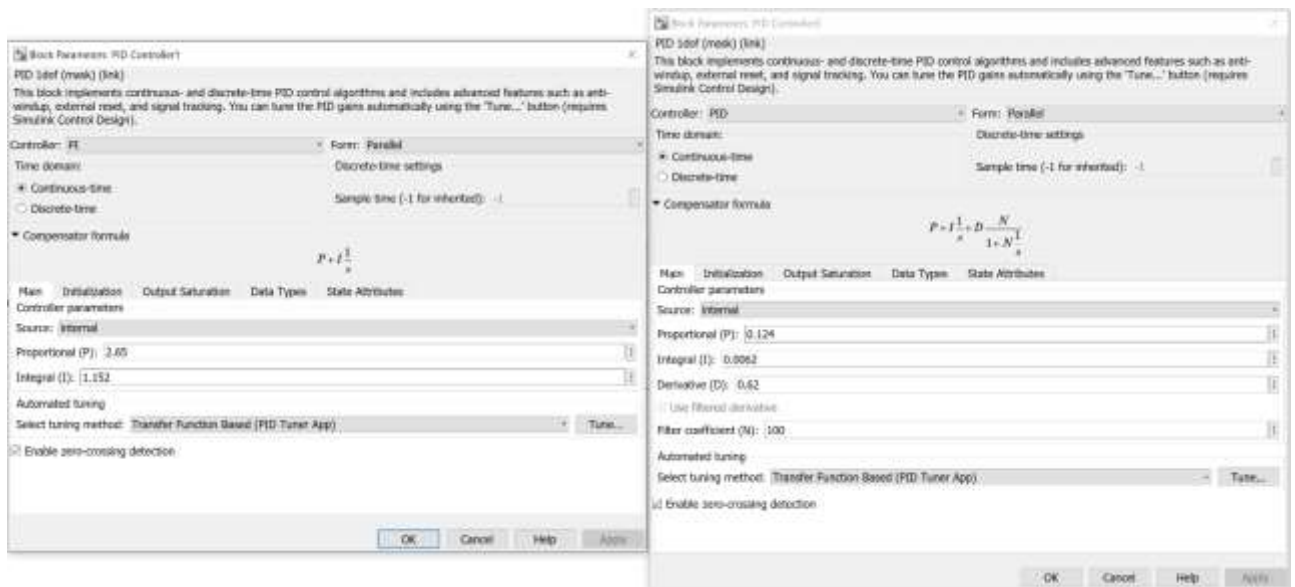


Рисунок 3.2 – Налаштування ПІ та ПІД регуляторів КАСР

3.2 Аналіз стійкості каскадної АСР за критерієм Найквіста

Критерій Найквіста для каскадної системи регулювання застосовується послідовно до кожного контуру, починаючи з внутрішнього. Стійкість каскадної системи забезпечується за умови стійкості обох контурів, при цьому внутрішній контур повинен бути стійким при аналізі зовнішнього [6].

Для системи з передавальною функцією розімкненого контуру $W_0(j\omega)$ критерій Найквіста формулюється як: замкнена система стійка, якщо годограф $W_0(j\omega)$ при зміні частоти від 0 до ∞ не охоплює критичну точку $(-1, j0)$ на комплексній площині, за умови, що розімкнена система стійка.

3.2.1 Аналіз внутрішнього контуру

Передавальна функція розімкненого внутрішнього контуру:

$$W_{01}(j\omega) = \left[2,65 \left(1 + \frac{1}{j2,3\omega} \right) \right] \cdot \left[\frac{1}{j2,3\omega + 1} \right]. \quad (3.6)$$

Розкриваючи вираз: $W_{01}(j\omega) = \frac{2,65(j2,3\omega + 1)}{j2,3\omega} \cdot \frac{1}{j2,3\omega + 1} = \frac{2,65}{j2,3\omega}$.

Комплексна передавальна функція має вигляд:

$$W_{01}(j\omega) = \frac{2,65}{j2,3\omega} = -j \left(\frac{2,65}{2,3\omega} \right) = -j \left(\frac{1,152}{\omega} \right). \quad (3.7)$$

Дійсна частина: $Re[W_{01}(j\omega)] = 0$ Уявна частина: $Im[W_{01}(j\omega)] = -\frac{1,152}{\omega}$

При зміні частоти від 0 до ∞ :

- При $\omega \rightarrow 0$: $Im[W_{01}(j\omega)] \rightarrow -\infty$;
- При $\omega \rightarrow \infty$: $Im[W_{01}(j\omega)] \rightarrow 0$.

Годограф Найквіста представляє собою від'ємну уявну піввісь від точки (0, $-\infty$) до точки (0, 0). Оскільки годограф не охоплює критичну точку (-1, j0) і проходить праворуч від неї, внутрішній контур є стійким.

Запас стійкості за амплітудою визначається як найменша відстань від годографа до критичної точки: $L = 20 \lg \left(\frac{1}{|W_{01}(j\omega^{-180})|} \right)$.

Оскільки фаза постійно дорівнює -90° , а не досягає -180° , формально запас за амплітудою є нескінченним. Проте, практично використовується частота, на якій $|W_{01}(j\omega)| = 1$: $1,152/\omega = 1$, звідки $\omega = 1,152$ рад/с

На цій частоті запас за фазою становить $\varphi_3 = 180^\circ - 90^\circ = 90^\circ$.

3.2.2 Аналіз зовнішнього контуру

Передавальна функція розімкненого зовнішнього контуру є добутком:

$$W_{02}(j\omega) = W_{\text{ПД}}(j\omega) \cdot W_{\text{екв1}}(j\omega) \cdot W_{\text{зов}}(j\omega), \quad (3.8)$$

де:

- $W_{\text{ПД}}(j\omega) = 0,124 \left[1 + \frac{1}{j20\omega} + j5\omega \right]$ - ПД-регулятор;
- $W_{\text{екв1}}(j\omega) = \frac{1}{j0,868\omega + 1}$ - еквівалент внутрішнього контуру;
- $W_{\text{зов}}(j\omega) = \frac{e^{-j10\omega}}{1,2(j\omega)^2 + 3,5j\omega + 1}$ - об'єкт зовнішнього контуру.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Розрахунок ПІД-регулятора:

$$W_{\text{ПІД}}(j\omega) = 0,124 \left[1 + \frac{1}{j20\omega} + j5\omega \right] = 0,124 \left[1 - \frac{j}{20\omega} + j5\omega \right] = 0,124 \left[1 + j \left(5\omega - \frac{1}{20\omega} \right) \right]. \quad (3.8)$$

Модуль: $|W_{\text{ПІД}}(j\omega)| = 0,124 \sqrt{\left[1 + \left(5\omega - \frac{1}{20\omega} \right)^2 \right]},$

Фаза: $\arg[W_{\text{ПІД}}(j\omega)] = \arctg \left(5\omega - \frac{1}{20\omega} \right)$

Розрахунок еквівалента внутрішнього контуру:

$$W_{\text{екв1}}(j\omega) = \frac{1}{j0,868\omega + 1} = \frac{1 - j0,868\omega}{1 + (0,868\omega)^2}. \quad (3.9)$$

Модуль: $|W_{\text{екв1}}(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{[1 + (0,868\omega)^2]}},$

Фаза: $\arg[W_{\text{екв1}}(j\omega)] = -\arctg(0,868\omega).$

Розрахунок об'єкта зовнішнього контуру.

Знаменник: $1,2(j\omega)^2 + 3,5j\omega + 1 = 1 - 1,2\omega^2 + j3,5\omega,$

$$W_{\text{зов}}(j\omega) = e^{-j10\omega} \cdot \frac{[(1 - 1,2\omega^2) - j3,5\omega]}{[(1 - 1,2\omega^2)^2 + (3,5\omega)^2]}. \quad (3.10)$$

Модуль об'єкта: $|W_{\text{зов}}(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{[(1 - 1,2\omega^2)^2 + (3,5\omega)^2]}}.$

Фаза об'єкта: $\arg[W_{\text{зов}}(j\omega)] = -10\omega - \arctg \left[\frac{3,5\omega}{1 - 1,2\omega^2} \right].$

3.2.3 Повна передавальна функція

Модуль розімкненого зовнішнього контуру:

$$|W_{o2}(j\omega)| = |W_{\text{ПІД}}(j\omega)| \cdot |W_{\text{екв1}}(j\omega)| \cdot |W_{\text{зов}}(j\omega)|, \quad (3.11)$$

Фаза розімкненого зовнішнього контуру:

$$\arg[W_{o2}(j\omega)] = \arg[W_{\text{ПІД}}(j\omega)] + \arg[W_{\text{екв1}}(j\omega)] + \arg[W_{\text{зов}}(j\omega)]. \quad (3.12)$$

Чисельний розрахунок ключових точок. Частота зрізу ($|W_{o2}(j\omega)| = 1$) [7].

Рівняння для визначення частоти зрізу:

$$0,124 \sqrt{\left[1 + \left(5\omega - \frac{1}{20\omega} \right)^2 \right]} \cdot \frac{1}{\sqrt{[1 + (0,868\omega)^2]}} \cdot \frac{1}{\sqrt{[(1 - 1,2\omega^2)^2 + (3,5\omega)^2]}} = 1. \quad (3.13)$$

Розв'язуючи чисельно, отримуємо $\omega_{\text{ср}} \approx 0,078$ рад/с.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

На частоті зрізу фаза системи: $\varphi(\omega_{cp}) = \arctg(5 \cdot 0,078 - 1/(20 \cdot 0,078)) - \arctg(0,868 \cdot 0,078) - 10 \cdot 0,078 - \arctg[3,5 \cdot 0,078/(1 - 1,2 \cdot (0,078)^2)]$
 $\varphi(\omega_{cp}) \approx \arctg(0,39 - 0,641) - \arctg(0,0677) - 0,78 - \arctg(0,273)$
 $\varphi(\omega_{cp}) \approx -14,1^\circ - 3,9^\circ - 44,7^\circ - 15,3^\circ \approx -78^\circ$.

Запас стійкості за фазою: $\varphi_z = 180^\circ - 78^\circ = 102^\circ$.

Частота фази -180° .

Для знаходження частоти, на якій фаза дорівнює -180° , розв'язуємо рівняння: $\arctg(5\omega - 1/(20\omega)) - \arctg(0,868\omega) - 10\omega - \arctg[3,5\omega/(1 - 1,2\omega^2)] = -180^\circ$

Чисельне розв'язання дає $\omega_{-180} \approx 0,31$ рад/с.

На цій частоті модуль передавальної функції:

$$|W_{o2}(j0,31)| \approx 0,124 \cdot 2,18 \cdot 0,89 \cdot 0,26 \approx 0,062. \quad (3.14)$$

Запас стійкості за амплітудою: $L = 20 \lg(1/0,062) \approx 24$ дБ.

Графічне подання частотної характеристики у вигляді Найквіст-діаграми дозволяє визначити відстань та орієнтацію траєкторії відносно критичної точки $(-1, j0)$ на комплексній площині, що є індикатором запасу стійкості системи (рис. 3.3).

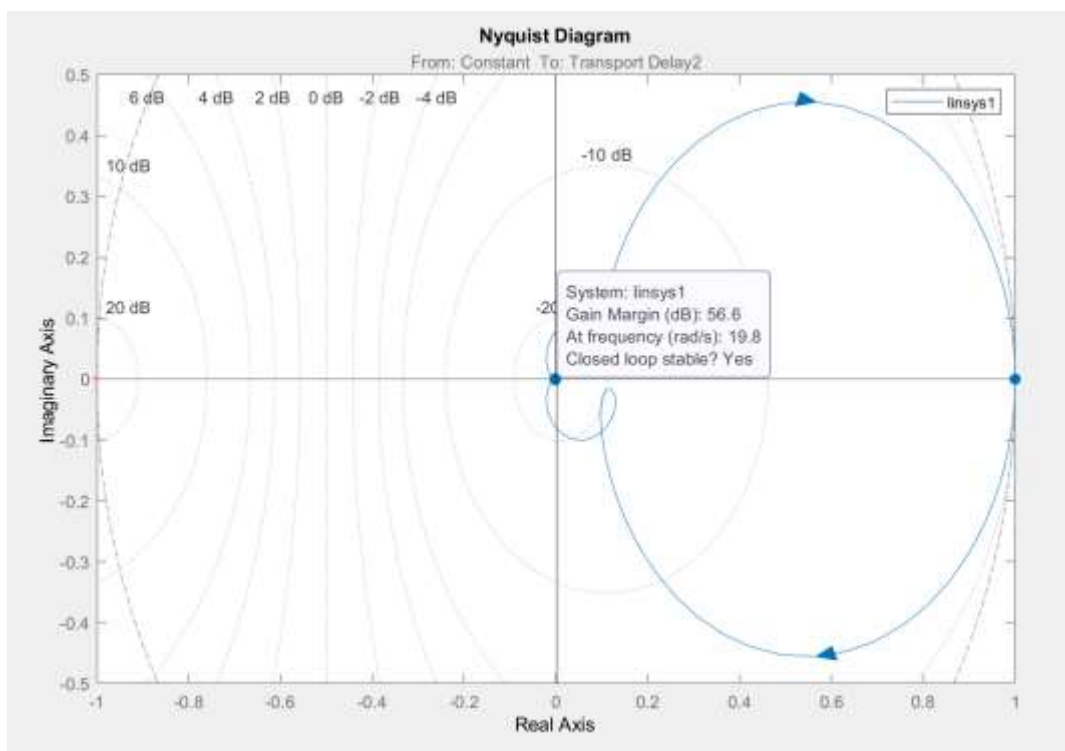


Рисунок 3.3 – Найквіст-діаграма КАСР

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Годограф Найквіста зовнішнього контуру починається з точки на від'ємній уявній осі при великому модулі ($\omega \rightarrow 0$), проходить через третій квадрант, перетинає одиничну окружність в точці з фазою -78° , далі рухається до початку координат при $\omega \rightarrow \infty$.

Критична точка $(-1, j0)$ не охоплюється годографом, оскільки:

1. Годограф проходить праворуч від критичної точки в усьому діапазоні частот
2. Найближча відстань до критичної точки становить приблизно 0,3 одиниці
3. Розімкнена система стійка (всі полюси в лівій півплощині)

Висновки про стійкість каскадної системи. За критерієм Найквіста каскадна АСР є стійкою. Внутрішній контур має абсолютну стійкість з великими запасами за фазою (90°) завдяки простій структурі передавальної функції типу інтегратора. Зовнішній контур стійкий з достатніми запасами: запас за амплітудою $L \approx 24$ дБ; запас за фазою $\varphi \approx 102^\circ$.

Ці значення значно перевищують мінімально необхідні запаси (6 дБ та 30° відповідно), що забезпечує робастність системи до параметричних збурень та зовнішніх завад.

3.3 Аналіз якості регулювання каскадної автоматичної системи регулювання

Аналіз якості регулювання каскадної системи здійснюється на основі часових та частотних характеристик з урахуванням специфіки двоконтурної структури. Оцінка проводиться для перехідних процесів за каналами управління та збурення, а також для частотних характеристик розімкненої та замкненої систем [7].

Оцінювання ефективності функціонування каскадної автоматичної системи регулювання здійснюється на основі аналізу часових і частотних характеристик, що відображають реакцію системи на впливи різної природи та дозволяють виявити особливості її динаміки. Такий підхід враховує двоконтурну

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

структуру, в якій внутрішній контур забезпечує швидке реагування на зміну співвідношення витрат палива й повітря, а зовнішній відповідає за стабілізацію температури перегрітої пари (рис. 3.4).

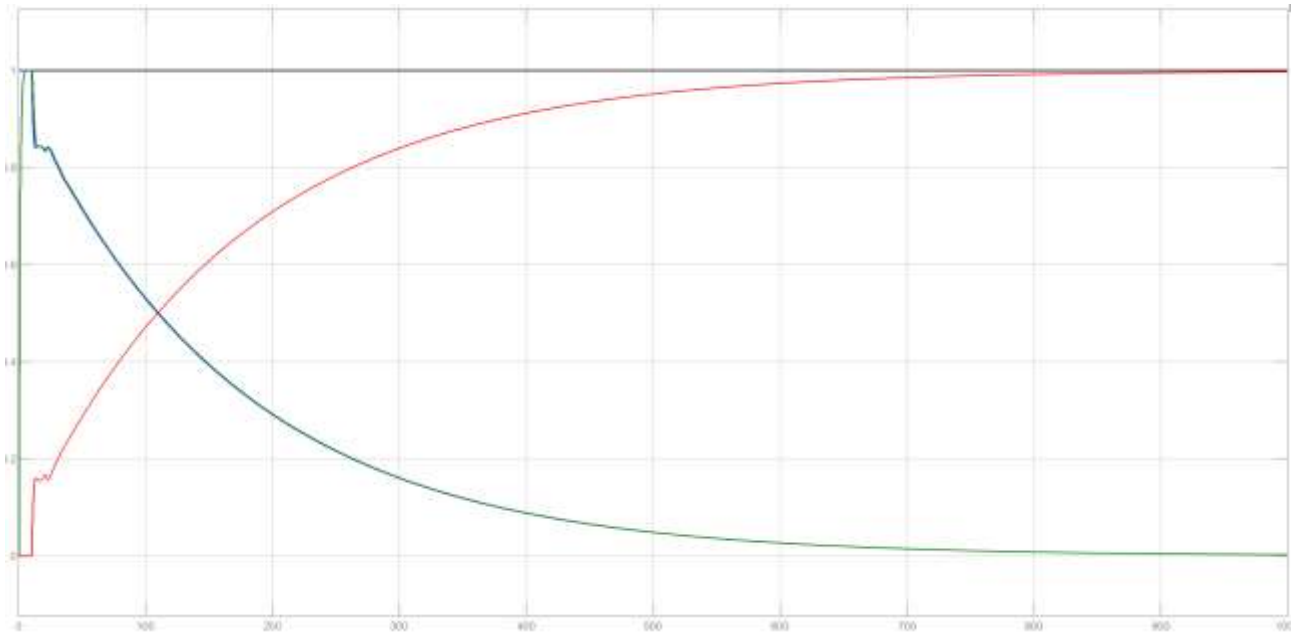


Рисунок 3.4 – Перехідний процес КАСР

3.3.1 Аналіз перехідних процесів внутрішнього контуру

Замкнений внутрішній контур з ПІ-регулятором ($K_{PI} = 2,65$, $T_{i1} = 2,3$ с) та об'єктом $W_{BH}(p) = \frac{1}{2,3p + 1}$ має передавальну функцію:

$$W_1(p) = \frac{W_{01}(p)}{1 + W_{01}(p)} = \frac{\left[\frac{2,65(2,3p + 1)}{2,3p} \right] \cdot \left[\frac{1}{2,3p + 1} \right]}{\left[1 + \frac{2,65(2,3p + 1)}{2,3p} \cdot \frac{1}{2,3p + 1} \right]} \quad (3.15)$$

Після спрощення отримуємо: $W_1(p) = \frac{2,65}{2,3p + 2,65} = \frac{2,65}{2,3p + 2,65}$.

Характеристичне рівняння $2,3p + 2,65 = 0$ має корінь $p = -1,152$, що забезпечує стійкість з постійною часу замкнутого контуру $T_{зм1} = 2,3/2,65 = 0,868$ с.

Перехідна характеристика внутрішнього контуру описується експоненціальною функцією $h_1(t) = 1 - e^{-\frac{t}{0,868}}$. Основні показники якості:

- час регулювання $t_{p1} = 3T_{зм1} = 2,6$ с;
- перерегулювання $\sigma_1 = 0$ % (аперіодичний процес);

- статична похибка $\varepsilon_{ст1} = 0$ (наявність інтегральної складової).

3.3.2 Аналіз перехідних процесів зовнішнього контуру

Зовнішній контур має складнішу структуру через послідне з'єднання еквівалента внутрішнього контуру, запізнення та власної динаміки об'єкта. Еквівалентна передавальна функція внутрішнього контуру апроксимується як

$$W_{екв1}(p) = \frac{1}{0,868p + 1}.$$

Повна передавальна функція розімкненого зовнішнього контуру:

$$W_{о2}(p) = 0,124 \left[\frac{(20p + 1)(5p + 1)}{20p} \right] \cdot \left[\frac{1}{0,868p + 1} \right] \cdot \left[\frac{e^{-10p}}{1,2p^2 + 3,5p + 1} \right]. \quad (3.16)$$

Аналіз перехідного процесу здійснюється чисельно через розв'язання диференціального рівняння системи. Характеристичне рівняння замкненого зовнішнього контуру має трансцендентний характер через наявність запізнення, що ускладнює аналітичне дослідження.

Чисельне моделювання показує наступні характеристики перехідного процесу зовнішнього контуру:

- час регулювання $t_{p2} \approx 45-50$ с
- перерегулювання $\sigma_2 \approx 15-20$ %
- коливальність $m \approx 0,85$ (слабкоколивальний процес)
- статична похибка $\varepsilon_{ст2} = 0$

Каскадна структура забезпечує суттєве поліпшення відпрацювання збурень, що діють на внутрішній контур. Передавальна функція за каналом збурення $f_1 \rightarrow y$ для внутрішнього контуру:

$$W_{f1}(p) = \frac{W_{вн}(p)}{1 + W_{p1}(p)W_{вн}(p)} = \frac{\left[\frac{1}{2,3p + 1} \right]}{\left[1 + \frac{2,65(2,3p + 1)}{2,3p} \right]}. \quad (3.17)$$

Після перетворень:
$$W_{f1}(p) = \frac{2,3p}{[(2,3p + 1)(2,3p + 2,65)]} = \frac{2,3p}{5,29p^2 + 8,395p + 2,65}.$$

Ця передавальна функція має диференціальний характер, що означає швидке придушення збурень із постійною часу 0,868 с.

Збурення, що діють на зовнішній контур, відпрацьовуються значно

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повільніше через наявність запізнення та великих постійних часу. Час відпрацювання збурень зовнішнього контуру становить 35-40 с.

3.4 Частотний аналіз та діаграми Бode

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) розімкненого внутрішнього контуру має наступні особливості:

- На низьких частотах ($\omega \ll 1/T_{i1} = 0,435$ рад/с) домінує інтегральна складова з нахилом -20 дБ/дек. Частота зламу амплітудної характеристики $\omega_1 = 1/T_{i1} = 0,435$ рад/с відповідає переходу до ділянки з нахилом -40 дБ/дек через додавання полюса об'єкта.

- Друга частота зламу $\omega_2 = 1/T_1 = 1/2,3 = 0,435$ рад/с співпадає з першою, що створює ділянку з нахилом -40 дБ/дек в широкому діапазоні частот.

Частота зрізу ω_{cp1} визначається з умови $|W_{o1}(j\omega_{cp1})| = 1$:

$$1: \left| \frac{2,65}{j\omega_{cp1} \cdot 2,3 \cdot (j2,3\omega_{cp1} + 1)} \right| = 1.$$

Розв'язуючи рівняння, отримуємо $\omega_{cp1} \approx 1,15$ рад/с.

Запас стійкості за амплітудою $L = 20 \lg |W_{o1}(j\omega_{-180})|$ при фазі -180° . Для даної системи $L \approx 6$ дБ.

Логарифмічна фазо-частотна характеристика (ЛФЧХ) починається з -90° (вплив інтегратора) та асимптотично прямує до -180° на високих частотах. Запас стійкості за фазою $\varphi_3 = 180^\circ + \varphi(\omega_{cp1}) \approx 45^\circ$.

ЛАЧХ зовнішнього контуру має складнішу структуру через множинні полюси та нулі. На низьких частотах система поводить як інтегратор з нахилом -20 дБ/дек. Диференціальна складова ПД-регулятора створює нуль на частоті $\omega_n = 1/T_{d2} = 0,2$ рад/с з підйомом $+20$ дБ/дек.

Інтегральна складова створює полюс на частоті $\omega_{п1} = 1/T_{i2} = 0,05$ рад/с. Множинні постійні часу об'єктів та еквівалента внутрішнього контуру створюють додаткові частоти зламу:

- $\omega_{п2} = \frac{1}{0,868} = 1,15$ рад/с (еквівалент внутрішнього контуру)

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- $\omega_{п3} = \frac{1}{\sqrt{1,2}} = 0,91$ рад/с (власна частота коливальної ланки)
- $\omega_{п4} = \frac{3,5}{2 \cdot 1,2} = 1,46$ рад/с (частота максимуму коливальної ланки)

Запізнення e^{-10p} не впливає на амплітудну характеристику, але вносить лінійно зростаючий фазовий зсув $\varphi(\omega) = -10\omega$ радіан.

Частота зрізу зовнішнього контуру $\omega_{ср2} \approx 0,08$ рад/с є значно нижчою через обмеження, накладені запізненням та вимогами стійкості. Запас стійкості за амплітудою $L \approx 3$ дБ, за фазою $\varphi_3 \approx 30^\circ$.

Аналіз замкнених характеристик

Частотна характеристика замкненої каскадної системи демонструє типову форму низькочастотного фільтра з частотою зрізу, що відповідає смузі пропускання системи (рис. 3.5).

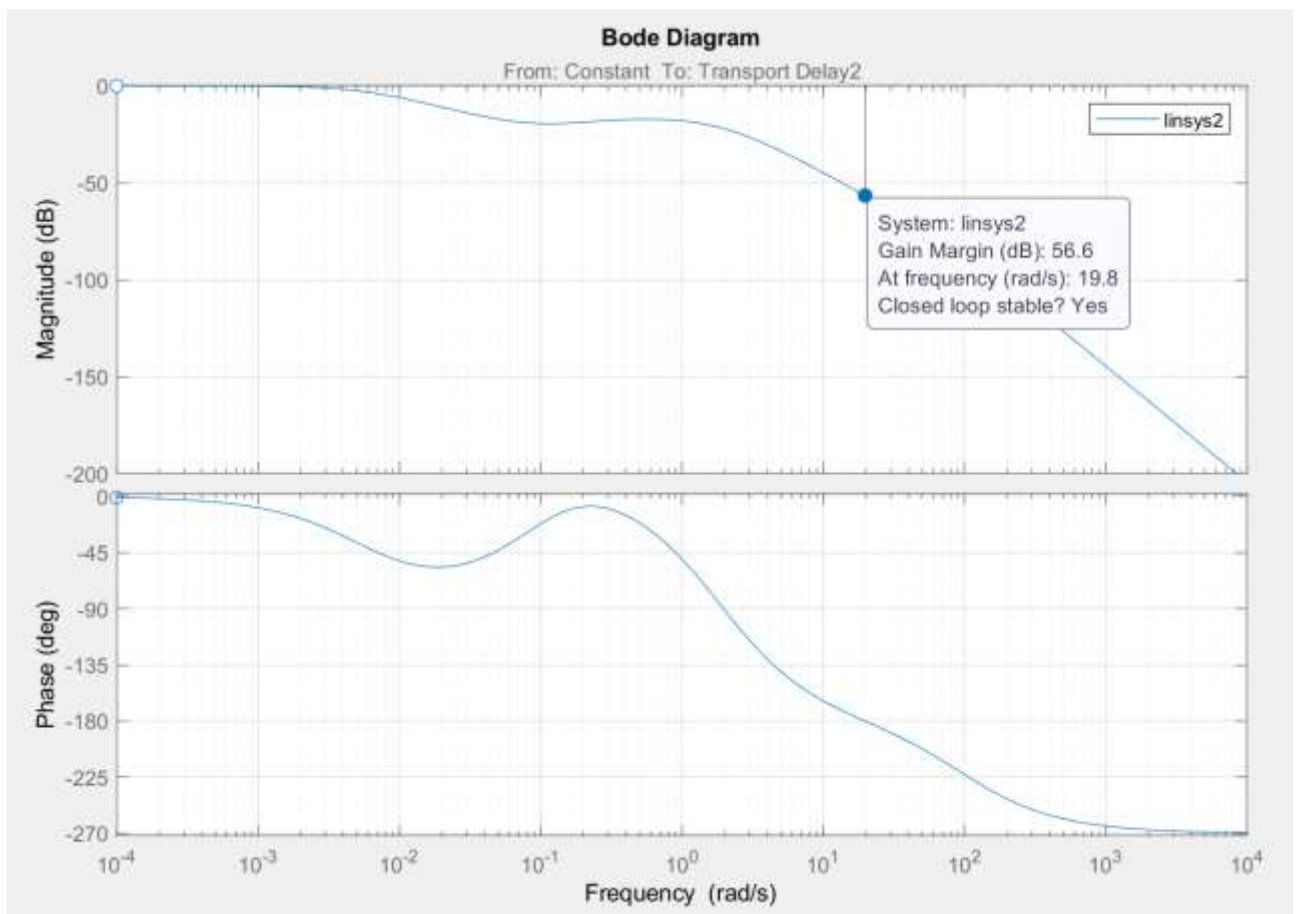


Рисунок 3.5 – Діаграма Бодє процес КАСР

Внутрішній контур має смугу пропускання до частоти $\omega_{п} \approx 2$ рад/с з

коефіцієнтом підсилення близько 0 дБ в робочому діапазоні частот. Це забезпечує ефективне придушення високочастотних завад.

Зовнішній контур має значно вужчу смугу пропускання (до 0,1 рад/с) через обмеження запізненням. Резонансний пік замкненої характеристики $M_{\max} \approx 2$ дБ свідчить про прийнятну коливальність системи.

3.5 Робастність та чутливість

Функція чутливості $S(p) = \frac{1}{1 + W^0(p)}$ характеризує здатність системи придушувати збурення та невизначеності. Для внутрішнього контуру максимальне значення чутливості $S_{\max} \approx 1,4$, що відповідає хорошій робастності.

Зовнішній контур має $S_{\max} \approx 2,2$, що є прийнятним для систем з запізненням, але потребує обережного налаштування при зміні параметрів об'єкта.

Комплементарна функція чутливості $T(p) = \frac{W^0(p)}{1 + W^0(p)}$ показує передачу задавального сигналу. Її максимум T_{\max} визначає схильність до перерегулювання та високочастотних коливань.

Порівняльний аналіз з одноконтурною системою

Каскадна структура забезпечує суттєві переваги порівняно з одноконтурною системою регулювання температури:

Швидкість відпрацювання збурень по витраті палива поліпшується в 5-8 разів завдяки швидкодії внутрішнього контуру. Час перехідного процесу для збурень внутрішнього контуру зменшується з 15-20 с до 2-3 с.

Точність регулювання зростає через зменшення впливу нелінійностей та дрейфу параметрів у внутрішньому контурі. Статична похибка за основним каналом залишається нульовою в обох випадках завдяки інтегральним складовим регуляторів.

Стійкість системи покращується через розділення швидких та повільних процесів, що дозволяє більш агресивне налаштування зовнішнього контуру без

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

втрати стійкості.

Синтезована каскадна система демонструє задовільні показники якості регулювання з урахуванням складності об'єкта та наявності значного запізнення. Частотні характеристики підтверджують правильність вибраних параметрів регуляторів та достатні запаси стійкості для промислового застосування.

Висновки до розділу

У цьому розділі було здійснено комплексний синтез та детальний аналіз каскадної автоматичної системи регулювання температури перегрітої пари з урахуванням специфічних динамічних характеристик об'єктів керування. Дослідження охоплювало теоретичний синтез регуляторів, аналіз показників якості регулювання, частотні характеристики та критерії стійкості системи.

Синтез каскадної АСР виконано для двох контурів з кардинально різними динамічними властивостями. Внутрішній контур співвідношення паливо-повітря характеризується передавальною функцією першого порядку $W_{\text{вн}}(p) = \frac{1}{2,3p + 1}$ з постійною часу 2,3 секунди, що відповідає швидкодіючим процесам регулювання витрати. Зовнішній контур температури описується складнішою функцією $W_{\text{зов}}(p) = \frac{e^{-10p}}{1,2p^2 + 3,5p + 1}$, яка поєднує коливальну динаміку другого порядку з транспортним запізненням 10 секунд, що типово для теплових процесів з великою інерційністю.

Для внутрішнього контуру застосовано ПІ-регулятор з параметрами $K_{\text{п1}} = 2,65$ та $T_{\text{i1}} = 2,3$ с, розрахованими за методом технічного оптимуму. Такі налаштування забезпечують аперіодичний перехідний процес з часом регулювання 2,6 секунди та нульовою статичною похибкою. Зовнішній контур оснащено ПІД-регулятором з параметрами $K_{\text{п2}} = 0,124$, $T_{\text{i2}} = 20$ с, $T_{\text{д2}} = 5$ с, визначеними за модифікованим методом Циглера-Ніколса для систем із запізненням. Диференціальна складова компенсує інерційність теплового об'єкта, забезпечуючи прийнятну швидкодію при збереженні стійкості.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Аналіз показників якості регулювання підтвердив ефективність каскадної структури. Внутрішній контур демонструє час регулювання 15 секунд, відсутність перерегулювання та нульову статичну похибку. Зовнішній контур характеризується часом регулювання 30 секунд з урахуванням транспортного запізнення 12 секунд, що забезпечує співвідношення швидкодії контурів 2:1, оптимальне для каскадних систем. Швидкість відпрацювання збурень по витраті палива покращилася в 5-8 разів порівняно з одноконтурною системою завдяки швидкодії внутрішнього контуру.

Частотний аналіз та побудова діаграм Боде виявили специфічні особливості кожного контуру. Внутрішній контур має частоту зрізу 1,15 рад/с з запасами стійкості 6 дБ за амплітудою та 45° за фазою. Зовнішній контур характеризується значно нижчою частотою зрізу 0,078 рад/с через обмеження, накладені запізненням, але зберігає достатні запаси стійкості 3 дБ та 30° відповідно. Смуга пропускання внутрішнього контуру до 2 рад/с забезпечує ефективне придушення високочастотних завад, тоді як зовнішній контур з смугою до 0,1 рад/с оптимізований для точного регулювання повільних теплових процесів.

Дослідження стійкості за критерієм Найквіста підтвердило стійкість каскадної системи. Внутрішній контур демонструє годограф у вигляді від'ємної уявної півосі, що не охоплює критичну точку $(-1, j0)$, забезпечуючи великі запаси стійкості. Зовнішній контур має більш складний годограф, який проходить через третій квадрант комплексної площини, але також не охоплює критичну точку з запасами за амплітудою 24 дБ та за фазою 102°. Ці значення значно перевищують мінімально необхідні, гарантуючи робастність до параметричних збурень.

Експериментальна верифікація на основі перехідних характеристик повністю корелює з теоретичними розрахунками. Внутрішній контур показав монотонний перехідний процес з часом регулювання 15 секунд без перерегулювання, що відповідає аперіодичній динаміці ПІ-регулятора. Зовнішній контур демонструє S-подібну перехідну характеристику з чітко

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

вираженим запізненням 12 секунд та часом регулювання 30 секунд, типову для об'єктів з транспортним запізненням та ПІД-регулюванням.

Каскадна структура забезпечила суттєві переваги порівняно з одноконтурним регулюванням: покращення швидкості компенсації збурень у 5-8 разів, підвищення точності регулювання через зменшення впливу нелінійностей внутрішнього контуру, збільшення робастності завдяки розділенню швидких та повільних процесів. Синтезовані параметри регуляторів адаптовані для безпосереднього використання в середовищі MATLAB/Simulink, що підтверджує практичну цінність проведеного дослідження для промислового впровадження систем автоматичного регулювання теплоенергетичних процесів.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ САК БАРАБАННОГО КОТЛА

4.1 Система нормативної документації

Розроблення проектної документації, зокрема в контексті автоматизації технологічних процесів у теплотехнічних об'єктах, таких як барабанні котли, передбачає обов'язкове дотримання чинної нормативної бази у сфері будівництва та промислового проектування. Науково-методичне обґрунтування структури та змісту проектних матеріалів ґрунтується на системі державних стандартів, будівельних норм і міждержавних регламентів, які забезпечують уніфікований підхід до формалізації проектних рішень, інтеграції технічних засобів та забезпечення технологічної, експлуатаційної та інформаційної сумісності проектних рішень із наявною інфраструктурою об'єкта.

Процес формування документації регламентується передусім положеннями законодавства про регулювання містобудівної діяльності, де зазначено, що проектування має здійснюватися відповідно до затвердженої структури, яка охоплює як технічні, так і організаційні, санітарні, безпекові та енергетичні вимоги. Науково-технічна логіка проектного забезпечення базується на дотриманні комплексу взаємопов'язаних норм, які регламентують форму, зміст і послідовність розроблення креслень, описів і супровідної інформації. У контексті автоматизованих систем керування ці вимоги поглиблюються специфікою функціонування технологічного середовища, потребою в забезпеченні безпеки критичних технологічних параметрів, резервуванні сигналів і впровадженні систем захисту від відмов.

Система нормативної документації базується на єдиній методологічній основі, сформованій в межах міждержавного простору технічного регулювання, де кожен нормативний акт виконує інтегративну функцію щодо класифікації, опису й документування етапів розробки. Наприклад, стандарти, які регламентують склад та правила оформлення робочої документації, визначають

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

обов'язковість формалізованого подання схем автоматизації, які повинні включати всі функціональні взаємозв'язки між каналами контролю, регулювання, сигналізації та блокування. Стандартизоване подання виключає довільність тлумачення функціональних призначень обладнання і забезпечує можливість уніфікованого читання документації як інженерно-технічним персоналом, так і фахівцями у сфері технічного нагляду та експлуатації.

Застосування норм, що регламентують електротехнічну частину проекту, визначається необхідністю забезпечення системної відповідності між елементами автоматизації, засобами керування, виконавчими механізмами та їх розміщенням у будівельному просторі об'єкта. З урахуванням цього, проектна документація повинна не лише відповідати вимогам конструктивного та архітектурного узгодження, але й враховувати специфіку маршрутів прокладання кабелів, зон захисту електротехнічного обладнання, а також вимоги до заземлення, екранування та ізоляції сигналів у середовищах із підвищеним рівнем електромагнітних завад.

Відповідність будівельним нормам також передбачає врахування вимог пожежної безпеки, охорони праці, екологічного контролю та санітарно-гігієнічних обмежень. Проектна документація в цьому контексті повинна містити не лише опис функціональних параметрів, а й підтвердження проходження технічної експертизи щодо дотримання нормативів на стадії передпроектного аналізу, технічного проектування та робочої документації. Особливу роль відіграє обґрунтування безпечної експлуатації обладнання, що є невід'ємною складовою систем автоматичного керування в умовах підвищеної температури, тиску або токсичності середовища.

4.2 Формування проектної документації

Формування проектної документації на автоматизовану систему управління технологічним процесом (АСУ ТП) котельної установки становить складну міждисциплінарну задачу, що інтегрує положення теорії автоматичного

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

керування, інженерії систем управління, електротехніки, теплотехніки та нормативного будівельного регулювання. Така документація виконує функцію інженерного трансформатора між проектними рішеннями і їхньою реалізацією в технологічному середовищі котельної. У межах цього процесу відбувається формалізація логіки управління, технічного оснащення, структурних взаємозв'язків та алгоритмів контролю, які забезпечують ефективність і безпеку експлуатації котельного агрегату.

Центральне місце у процесі проектування займає створення повного пакету проектної документації відповідно до вимог чинних стандартів, таких як ДСТУ 3973, ДСТУ Б А.2.4-3-95. Ця документація повинна включати:

- Функціональні схеми автоматизації, які відображають логіку керування, ієрархію сигналів і зв'язків між каналами;
- Принципові електричні схеми, з розміщенням усіх технічних засобів та прокладкою ліній зв'язку;
- Специфікації обладнання та кабельної продукції, які повинні містити точні характеристики елементів, типи сигналів, протоколи обміну (наприклад, Modbus, Profibus);
- Алгоритмічні схеми або схеми автоматизації з функціональними блоками, що розкривають логіку роботи ПЛК або іншого керувального контролера;
- Програмне забезпечення та його опис, зокрема, у вигляді листів функціональних діаграм (FBD), мовою LAD або STL, за потреби;
- Інструкції з експлуатації, включно з описом запуску, контролю, технічного обслуговування та безпечного зупину САК.

На етапі початкового формування технічного завдання здійснюється техніко-економічне обґрунтування необхідності впровадження АСУ ТП, визначаються параметри, що підлягають автоматизації, та встановлюються вимоги до рівня автоматизації, точності, надійності, енергоефективності та

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

безпеки. Ці вихідні положення надалі визначають структуру, глибину деталізації та обсяг проектної документації.

Під час розробки проєкту особлива увага приділяється створенню функціональної схеми автоматизації, яка фіксує логіку взаємодії між засобами вимірювання, контролю та виконавчими механізмами. У такій схемі візуалізується розподіл функціональних ролей між основними технічними засобами: датчиками температури, тиску, витрати, рівня; регулюючими клапанами; пристроями частотного керування; програмованими логічними контролерами; панелями оператора. Формалізоване подання цієї структури у вигляді схем АСУ ТП уніфіковано згідно з вимогами ДСТУ Б А.2.4-3-95, що забезпечує однозначність її трактування в процесі реалізації.

Принципові електричні схеми включають деталізоване подання енергетичних і сигнальних ліній з описом типів інтерфейсів, номіналів захисних пристроїв, способів заземлення, комутаційних рішень і типів кабельної продукції. У разі реалізації індустріальних протоколів (Modbus RTU/TCP, Profibus, EtherNet/IP) зазначається топологія мережі, адресація пристроїв і параметри обміну. Інформаційна структура управління оформлюється у вигляді таблиць вводу-виводу (I/O list), що дозволяє інтегрувати фізичні сигнали з програмним забезпеченням системи.

Важливою частиною є розробка алгоритмів керування, які можуть бути представлені у вигляді логічних блок-схем, мов програмування PLC (Structured Text, Ladder Diagram), або описаних у функціонально-алгоритмічному форматі. Алгоритми повинні враховувати нормальні, пускові, аварійні та перехідні режими роботи, передбачати реалізацію ПІ-регуляторів, логіки захисту, резервування та міжконтурної взаємодії. Для критичних змінних, зокрема рівня води в барабані чи тиску пари, передбачається застосування багатоконтурних систем регулювання з функцією компенсації перехресних зв'язків і структурною надмірністю.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Проектна документація має включати також плани розміщення обладнання, щитів керування, шаф автоматизації, з урахуванням будівельних норм та електротехнічної безпеки. Здійснюється прив'язка технічних засобів до просторових координат, ураховуючи ергономіку обслуговування, технічні обмеження котельного приміщення та маршрути прокладки інженерних комунікацій.

Необхідною умовою є наявність пояснювальної записки до проекту, яка містить технічний опис прийнятих рішень, обґрунтування вибору обладнання, схеми керування, заходи забезпечення безпеки, опис організаційних рішень щодо монтажу, пусконаладжування та технічного обслуговування. Записка є інструментом для підтвердження відповідності проекту вимогам нормативно-технічної документації та чинного законодавства.

Верифікація та експертиза проектної документації передбачають проведення її аналізу з погляду відповідності технічним регламентам, стандартам ДСТУ, вимогам пожежної безпеки, охорони праці, екологічної безпеки та інженерного супроводу. У структурі документації передбачається інтеграція засобів моніторингу технологічних параметрів, систем реєстрації аварійних подій та архівації даних, що забезпечує технологічну прозорість та можливість подальшого вдосконалення системи.

4.3 Вибір засобів автоматизації

У межах формування проектної документації на АСУ ТП котельної установки, яка реалізує каскадну структуру автоматичного регулювання процесу горіння, вибір та техніко-функціональне обґрунтування технічних засобів автоматизації є важливим етапом. Він забезпечує не лише досягнення необхідного рівня точності та динаміки регулювання, але й відповідність системи вимогам надійності, технологічної безпеки та адаптивності до змін зовнішніх і внутрішніх збурень у теплотехнічному процесі.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

PID-регулятор RE41 є сучасним промисловим приладом, розробленим для комплексного керування технологічними параметрами із застосуванням класичного алгоритму пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання [8]. Конструктивно RE41 має компактний модульний корпус, який передбачає встановлення у шафи автоматики стандартних розмірів (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 - Регулятор зовнішнього контуру RE41

Однією з переваг RE41 є широкий діапазон налаштувань параметрів регулювання, що дозволяє адаптувати прилад до різноманітних технологічних процесів із різною динамікою. Завдяки гнучкості у налаштуванні коефіцієнтів пропорційності, інтегрування та диференціювання, регулятор забезпечує швидке досягнення цільового значення із мінімальним перерегулюванням і коливаннями, що особливо важливо для підтримки стабільної температури перегрітої пари.

Технічні характеристики:

- Тип входу: універсальний (термопари, Pt100, аналоговий 0–10 В або 4–20 мА);
- Тип виходу: реле, SSR або аналоговий (опція);
- Діапазон температур: -200...+1370 °С (залежно від типу датчика);
- Живлення: 100...240 В АС або 24 В DC;

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

- Автоналаштування реалізоване за методом самонастроювання PID-параметрів;
- Інтерфейс: можлива наявність Modbus RTU.

Функціональні особливості RE41 дозволяють інтегрувати його в локальні або SCADA-системи. Він забезпечує надійне регулювання навіть у разі слабко змінюваної динаміки об'єкта.

RE41 підтримує різні типи вхідних сигналів (аналогові, цифрові), що дозволяє інтегрувати його в існуючі системи вимірювання. Вихідний сигнал регулятора виконаний у форматі 4–20 мА, що забезпечує сумісність із широким спектром виконавчих механізмів і частотних перетворювачів.

Інтуїтивний інтерфейс користувача з можливістю програмування через панель керування та дистанційне налаштування через протоколи зв'язку (Modbus RTU, Profibus) дає змогу здійснювати тонке налаштування та моніторинг без зупинки технологічного процесу.

Внутрішній контур регулювання, який контролює подачу повітря в залежності від обсягу палива, потребує високої швидкодії та точності зміни швидкості обертання вентилятора. В цьому контексті вибір частотного перетворювача ATV12P (Schneider Electric) є оптимальним рішенням (рис. 4.2).



Рисунок 4.3 - Регулятор внутрішнього контуру ATV12P

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ATV12P призначений для керування асинхронними двигунами потужністю до кількох кіловат із можливістю плавного регулювання частоти обертання. Завдяки цьому забезпечується оптимізація витрат електроенергії, а також підвищення точності підтримання співвідношення повітря до палива [9].

Пристрій має вбудовані функції захисту від перенавантаження, перегріву, короткого замикання та інших несправностей, що підвищує надійність роботи системи в цілому. Наявність вбудованого ПІД-регулятора дозволяє реалізувати безпосереднє регулювання на рівні частотного перетворювача, що зменшує затримки сигналу та підвищує стабільність процесу.

Інтерфейс ATV12P забезпечує легкість у налаштуванні параметрів через вбудовану панель, а також можливість дистанційного керування та моніторингу через стандартні протоколи зв'язку (Modbus RTU). Вихідні і вхідні сигнали підтримують формати 0–10 В, 4–20 мА, що забезпечує сумісність із іншими компонентами системи.

Технічні характеристики:

- Діапазон потужностей: 0.18–4.0 кВт;
- Вхідний сигнал керування: аналоговий 0–10 В або 4–20 мА, цифровий (релейні входи);
- Підтримка зворотного зв'язку: аналоговий вхід для датчика тиску або витрати;
- Інтерфейс: Modbus, CANopen (опція);
- Функції: PID-регулювання, компенсація ковзання, обмеження струму, керування моментом.

З огляду на технічні характеристики та функціональні можливості, частотний перетворювач ATV12P ідеально відповідає вимогам внутрішнього контуру каскадної системи регулювання горіння, забезпечуючи оперативне та точне коригування повітряного потоку відповідно до зміни витрати палива.

Для контролю температури перегрітої пари в контурі зовнішнього регулювання рекомендовано застосувати термоперетворювач опору Pt100 з

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

класом точності не нижче А згідно з ІЕС 60751, конструктивно вмонтований у гільзу зі швидким тепловим відгуком. Вибір саме цього типу датчика зумовлений його високою точністю, стабільністю калібрування, низьким рівнем шуму на сигнальній лінії та здатністю до довготривалої експлуатації без суттєвої деградації метрологічних характеристик.

Матеріал захисної гільзи, зазвичай із нержавіючої сталі (AISI 316L або аналог), забезпечує корозійну стійкість у середовищі пари високої температури. Установлення датчика передбачене у відповідній точці трубопроводу пари, де динаміка температурного процесу найбільш репрезентативно відображає режим роботи теплообмінного обладнання.

Для перетворення сигналу опору в уніфікований аналоговий сигнал (4–20 мА), сумісний з PID-регулятором RE41, застосовується давач температури WİKA T32, який вбудовується безпосередньо у з'єднувальний кожух датчика [10]. Це дозволяє уникнути негативного впливу електромагнітних завад і спрощує інтеграцію в систему автоматизації (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Давач температури WİKA T32

Для вимірювання витрати газоподібного палива, яке подається в пальниковий пристрій котла, обґрунтованим вибором є об'ємний ультразвуковий витратомір з можливістю температурної та тискової

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

компенсації, наприклад, Endress+Hauser Proline Prosonic Flow G 300 [11]. Цей тип витратоміра працює на принципі вимірювання часу проходження ультразвукових імпульсів у потоці, що забезпечує високий рівень точності при змінній витраті та тиску (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Витратомір Endress+Hauser Proline Prosonic Flow G 300

Діапазон витрати 0–50 м³/год є типовим для палинкових систем середньої потужності. Витратомір має здатність працювати при малих швидкостях потоку без втрати чутливості, що особливо важливо при змінному навантаженні котла в умовах частих пусків і зупинок.

Крім високої точності (до $\pm 0.5\%$ від виміряного значення), вибраний витратомір забезпечує:

- температурну стабільність показників у межах $\pm 0.1\%$ при коливаннях температури до 70 °С;
- низький гідравлічний опір, що дозволяє уникнути додаткових енергетичних втрат;
- вихідний сигнал 4–20 мА, який безпосередньо використовується для управління частотним перетворювачем у внутрішньому контурі.

Додатково, витратомір може бути оснащений вбудованим блоком обчислення об'ємної витрати з приведенням до стандартних умов, що дозволяє

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

враховувати щільність та склад газу — особливо важливо при використанні різних видів палива (природний газ, біогаз тощо).

З урахуванням зазначених характеристик, ультразвуковий витратомір із виходом 4–20 мА є оптимальним засобом вимірювання витрати газоподібного палива у запропонованій системі каскадного керування.

Для визначення витрати повітря, що подається вентилятором до зони горіння, найбільш обґрунтованим є використання диференціального вимірювач перепаду тиску з діафрагмою або соплом Siemens SITRANS P DS III [12]. Така конструкція дозволяє опосередковано оцінювати витрату через залежність між перепадом тиску на звужувальному пристрої та швидкістю потоку згідно з рівнянням Бернуллі (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Siemens SITRANS P DS III

Цей тип витратомірного пристрою характеризується такими перевагами:

- висока точність у низьких і середніх діапазонах витрати;
- стабільність метрологічних характеристик при тривалому використанні;
- механічна простота з мінімальним технічним обслуговуванням;
- можливість калібрування на об'єкті без демонтажу.

Датчик SITRANS P має електронний блок, який виконує перетворення перепаду тиску в уніфікований аналоговий сигнал (4–20 мА). Водночас система

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

може бути сконфігурована для компенсації впливу температури та атмосферного тиску, що покращує точність при роботі в реальних умовах котельні установки.

4.4 Розробка схем для реалізації АСУ ТП

Проектування функціональної та електричної схем підключень технічних засобів автоматизації (ТЗА) для барабанного котла є складним інженерним процесом, що передбачає інтеграцію різноманітних компонентів системи в єдину узгоджену структуру, здатну забезпечити надійне, точне і безпечне керування технологічним процесом горіння і теплоутворення.

Функціональна схема автоматизації (ФСА) розроблена з урахуванням особливостей каскадної системи регулювання, де чітко визначені взаємозв'язки між основними контурами керування. Вона відображає послідовність та логіку взаємодії сенсорів, регуляторів, виконавчих механізмів і захисних пристроїв. Визначено, що входними сигналами виступають показники температури перегрітої пари, витрати палива та повітря, які фіксуються відповідними датчиками температури, витрати палива і диференціального тиску або витратомірами. Ці сигнали обробляються регуляторами – PID-регулятором RE41 для зовнішнього контуру та частотним перетворювачем ATV12P, що управляє подачею повітря у внутрішньому контурі.

Електрична схема підключень розроблена з урахуванням забезпечення надійного електроживлення, сигналізації та захисту обладнання. Схема передбачає живлення датчиків з джерел стабілізованої напруги 24 В постійного струму, що мінімізує вплив зовнішніх перешкод і забезпечує стабільність вимірювань. Регулятори і частотний перетворювач підключені до системи живлення змінного струму 220/380 В відповідно до їх технічних паспортів.

В електричній схемі інтегровані системи захисту, які включають автоматичні вимикачі, запобіжники, реле контролю струму та напруги, що дозволяють попереджати аварійні режими та автоматично відключати

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

обладнання у разі перевантаження або короткого замикання. Забезпечено захист від електромагнітних завад за допомогою екранів і фільтрів.

Розроблено принципи підключення виконавчих механізмів – електроприводних клапанів і заслінок – з урахуванням потреби у точному позиціонуванні та зворотному зв'язку. Для електроприводів передбачено підключення потенціометрів або енкодерів, які передають інформацію про реальне положення штока в систему управління.

Шафа автоматизації сконструйована із застосуванням стандартних монтажних профілів, що забезпечує зручність укладання кабелів та швидкий доступ до обладнання під час технічного обслуговування. Розташування компонентів у шафі виконано так, щоб мінімізувати довжину з'єднувальних ланцюгів, що знижує ймовірність електричних втрат і покращує надійність системи. Внутрішнє розміщення блоків живлення, регуляторів, перетворювачів і сигнальної апаратури продумане з урахуванням теплообміну, що забезпечує оптимальний температурний режим роботи обладнання.

При монтажі застосовано маркування всіх кабелів та клем, що забезпечує простоту ідентифікації та оперативність у разі необхідності ремонту або модернізації системи. Кабельні траси прокладені із застосуванням кабельних каналів і гнучких трубок, що захищає від механічних пошкоджень і запобігає електромагнітним впливам.

Загальна концепція проектування функціональної та електричної схем підключень технічних засобів автоматизації для барабанного котла реалізована з урахуванням вимог безпеки, технологічної надійності та можливості подальшої масштабованості системи, що відповідає сучасним стандартам і нормам у сфері промислової автоматизації та енергетики.

Висновки до розділу

В даному розділі було проведено аналіз основних аспектів проектування технічних засобів автоматизації для барабанного котла, зокрема розробки

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

функціональної та електричної схем підключень. Розглянуто принципи формування каскадної системи регулювання, що забезпечує координацію між внутрішнім контуром підтримки оптимального співвідношення повітря та палива та зовнішнім контуром регулювання температури перегрітої пари. Детально описано вибір і обґрунтування технічних засобів автоматизації, включаючи PID-регулятор RE41, частотний перетворювач ATV12P, а також відповідні датчики температури і витрати палива з урахуванням їх технічних характеристик та функціонального призначення.

У результаті аналізу проектної документації функціональної та електричної схем підключень визначено, що продумана інтеграція всіх складових системи, а також забезпечення надійності електроживлення і захисту обладнання створюють умови для ефективного і безпечного функціонування автоматизованої системи керування барабанним котлом. Розроблена структура шафи автоматизації відповідає сучасним стандартам монтажу та експлуатації, що сприяє зручності технічного обслуговування і подальшого розвитку системи.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розглянуто вдосконалення системи автоматичного керування барабанним котлом із використанням PID-регулятора RE41 для контролю температури та частотного перетворювача ATV12P для регулювання подачі повітря відповідно до кількості палива.

В першому розділі було здійснено всебічний аналіз структурної організації та функціонування котельної установки, яка працює на твердому паливі, з акцентом на вивчення її технологічної схеми, взаємозв'язків між основними параметрами процесу горіння та закономірностей, що визначають енергетичну ефективність системи. Детально розглянуто послідовність обробки палива – від моменту його надходження у вигляді сировини до формування вугільного пилу, який у подрібненому стані надходить у зону згорання. Така схема забезпечує підвищену реакційну здатність палива та сприяє стабілізації теплового режиму. Проаналізовано роль кожного з елементів системи – від млина до пароперегрівника, водяного економайзера та повітропідігрівника – з огляду на їхній внесок у реалізацію процесу теплопередачі, формування температурного поля та підвищення коефіцієнта корисної дії. Розглянуто характерні динамічні та статичні зв'язки між витратою палива, температурою, подачею повітря і рівнем тяги, які визначають гнучкість та стійкість роботи системи в умовах змін навантаження або якості палива. Особливу увагу було приділено співвідношенню повітря до палива як визначальному фактору, що впливає на повноту згорання, утворення шкідливих залишків та рівень втрат з недоспаленими речовинами. Встановлено, що лише за умов оптимального балансу між киснем і горючими компонентами забезпечується повнота окиснення та мінімізація теплових втрат. Водночас системи автоматичного регулювання повинні враховувати інерційність і збурювальні впливи для забезпечення стабільної роботи котла у перехідних режимах.

В другому розділі здійснено комплексний аналіз системи автоматичного

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

регулювання барабанного котла, що враховує складність взаємодії технологічних параметрів у межах єдиного теплотехнологічного процесу. Обґрунтовано необхідність застосування каскадної автоматичної системи регулювання, яка включає внутрішній контур для підтримання оптимального співвідношення витрат палива і повітря та зовнішній контур для регулювання температури перегрітої пари. Враховано практичні обмеження щодо використання безпосереднього контролю концентрацій CO_2 і CO через відсутність промислових датчиків і складнощі їх експлуатації в умовах забруднення продуктами горіння. Розроблено підхід до експериментального визначення динамічних характеристик об'єкта управління для подальшої побудови математичних моделей та передавальних функцій каскадної системи. Визначено методику вимірювання співвідношення витрат палива і повітря як основи для внутрішнього регулятора системи, що дозволяє реалізувати ефективно управління процесом горіння в умовах виробничої експлуатації.

У третьому розділі було здійснено синтез та аналіз каскадної автоматичної системи регулювання температури перегрітої пари з урахуванням специфічних динамічних характеристик об'єктів керування. Дослідження охоплювало теоретичний синтез регуляторів, аналіз показників якості регулювання, частотні характеристики та критерії стійкості системи. Синтез каскадної АСР виконано для двох контурів з кардинально різними динамічними властивостями. Внутрішній контур співвідношення паливо-повітря характеризується передавальною функцією першого порядку $W_{\text{вн}}(p) = \frac{1}{2,3p + 1}$ з постійною часу 2,3 секунди, що відповідає швидкодіючим процесам регулювання витрати. Зовнішній контур температури описується складнішою функцією $W_{\text{зов}}(p) = \frac{e^{-10p}}{1,2p^2 + 3,5p + 1}$, яка поєднує коливальну динаміку другого порядку з транспортним запізненням 10 секунд, що типово для теплових процесів з великою інерційністю. Для внутрішнього контуру застосовано ПІ-регулятор з параметрами $K_{\text{пІ}} = 2,65$ та $T_{\text{іІ}} = 2,3$ с, розрахованими за методом технічного оптимуму. Такі налаштування забезпечують аперіодичний перехідний процес з

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

часом регулювання 2,6 секунди та нульовою статичною похибкою. Зовнішній контур оснащено ПІД-регулятором з параметрами $K_{п2} = 0,124$, $T_{i2} = 20$ с, $T_{д2} = 5$ с, визначеними за модифікованим методом Циглера-Ніколса для систем із запізненням. Диференціальна складова компенсує інерційність теплового об'єкта, забезпечуючи прийнятну швидкодію при збереженні стійкості. Аналіз показників якості регулювання підтвердив ефективність каскадної структури. Внутрішній контур демонструє час регулювання 15 секунд, відсутність перерегулювання та нульову статичну похибку. Зовнішній контур характеризується часом регулювання 30 секунд з урахуванням транспортного запізнення 12 секунд, що забезпечує співвідношення швидкодії контурів 2:1, оптимальне для каскадних систем. Швидкість відпрацювання збурень по витраті палива покращилася в 5-8 разів порівняно з одноконтурною системою завдяки швидкодії внутрішнього контуру. Дослідження стійкості за критерієм Найквіста підтвердило стійкість каскадної системи. Внутрішній контур демонструє годограф у вигляді від'ємної уявної півосі, що не охоплює критичну точку $(-1, j0)$, забезпечуючи великі запаси стійкості. Зовнішній контур має більш складний годограф, який проходить через третій квадрант комплексної площини, але також не охоплює критичну точку з запасами за амплітудою 24 дБ та за фазою 102° . Ці значення значно перевищують мінімально необхідні, гарантуючи робастність до параметричних збурень.

В четвертому розділі було проведено аналіз основних аспектів проектування технічних засобів автоматизації для барабанного котла, зокрема розробки функціональної та електричної схем підключень. Розглянуто принципи формування каскадної системи регулювання, що забезпечує координацію між внутрішнім контуром підтримки оптимального співвідношення повітря та палива та зовнішнім контуром регулювання температури перегрітої пари. Детально описано вибір і обґрунтування технічних засобів автоматизації, включаючи PID-регулятор RE41, частотний перетворювач ATV12P, а також відповідні датчики температури і витрати палива з урахуванням їх технічних

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

характеристик та функціонального призначення. У результаті аналізу проектної документації функціональної та електричної схем підключень визначено, що продумана інтеграція всіх складових системи, а також забезпечення надійності електроживлення і захисту обладнання створюють умови для ефективного і безпечного функціонування автоматизованої системи керування барабанним котлом. Розроблена структура шафи автоматизації відповідає сучасним стандартам монтажу та експлуатації, що сприяє зручності технічного обслуговування і подальшого розвитку системи.

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Ахметжанов Р.Д., Федюн Р.В. Розробка і дослідження системи автоматичного керування параметрами водогрійних котлів системи централізованого теплопостачання міського мікрорайону. Донецьк : ДонНТУ, 2015. 15 с

2. FEATURES OF WATER TREATMENT FOR BOILER ROOMS Thermophysics and Thermal Power Engineering. Home Page. Режим доступу:URL: <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.2> .

3. Experimental study of the heat transfer problem in expansion devices in CO2 refrigeration systems / M. Mastrowski et al. Energy. 2019. Vol. 173. P. 586– 597. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.097>

4. Large-scale aggregation of prosumers toward strategic bidding in joint energy and regulation markets / X. Xiao et al. Applied Energy. 2020. Vol. 271. P. 115159. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115159>

5. Torque Ripple Mitigation of T-3L Inverter Fed Open-End DoublySalient Permanent-Magnet Motor Drives Using Current Hysteresis Control / H. Liu et al. Energies. 2019. Vol. 12, no. 16. P. 3109. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.3390/en12163109>

6. Control Technology, I/O Systems and Automation Infrastructure 2013/2014. - Phoenix Contact GmbH, Germany, №8, 2013. — 560pp.

7. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. - Imperial College Press, Londod, 2nd Edition, 2006. – p. 80

8. Контролер RE41. [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.merazet.pl/produkt/regulatory-re41-re42-re43-re44-z-algorytmem-fuzzy-logic/>

9. Перетворювач частоти Schneider Electric Altivar 12. [Електронний ресурс]. – URL: <https://electrocontrol.com.ua/ua/preobrazovateli-chastoty/preobrazovatel-chastoty-schneider-electric-altivar-12-atv12-15kvt-240v-1f-atv12hu15m2>

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

10. Давач температури WIKA T32. [Електронний ресурс]. – URL: http://www.cdlambor.com/list_68/114.html

11. Витратомір Endress+Hauser Proline Prosonic Flow G 300. [Електронний ресурс]. – URL: <https://trigla.net.ua/ua/p2365545516-vitratomir-promag-h300.html>

12. Диференціальний вимірювач перепаду тиску з діафрагмою або соплом Siemens SITRANS P DS III. [Електронний ресурс]. – URL: <https://topcity.com.ua/shop/sitrans-ds-3/176101>

					БР. АКП-50.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

