

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ

Група АКПз-22-1

Олег Козороз

2026

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

Козороз Олег Григорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.51

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОТЕЛЬНИМ АГРЕГАТОМ

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПз-22-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

О.Г. Козороз

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

М.В. Шавранський

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри АКІТ

« » 2026 року

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

Козорозу Олегу Григоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Синтез автоматичної системи керування котельним агрегатом

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

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

затвердені наказом закладу вищої освіти від «29» квітня 2026 року № 38/8

2. Строк подання студентом роботи 12.06.2026 р.

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

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

1. Аналіз котельного агрегату як об'єкта автоматичного контролю і керування.

2. Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування.

3. Синтез та аналіз системи автоматичного керування.

4. Розробка проектної складової системи керування.

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

Лист 1 - Технологічна схема котельного агрегату - БР.АКПз-12.00.00.000 01.

Лист 2 – Математичне моделювання - БР.АКПз-12.00.00.000 02.

Лист 3 – Розроблення одноконтурної АКС - БР.АКПз-12.00.00.000 03.

Лист 4 – Розроблення каскадної АСК - БР.АКПз-12.00.00.000 04.

Лист 5 – Вибір технічних засобів автоматизації - БР.АКПз-12.00.00.000 05.

Лист 6 – Функціональна схема автоматизації - БР.АКПз-12.00.00.000 06.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз котельного агрегату як об'єкта автоматичного контролю і керування	11.05.2026	
2.	Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування	21.05.2026	
3.	Синтез та аналіз системи автоматичного керування	29.05.2026	
4.	Розробка проектної складової системи керування	08.06.2026	

Студент _____
(підпис)

О.Г. Козороз _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

І.І. Чигур _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 58 сторінки друкованого тексту, 12 рисунків, 7 таблиць, 5 посилань на джерела.

Тема: «Синтез автоматичної системи керування котельним агрегатом».

Об'єкт дослідження: технологічний процес виробництва перегрітої пари в котельному агрегаті.

Мета роботи: синтез одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування температурою перегрітої пари котельного агрегату.

Методи дослідження: аналіз технологічного процесу котельного агрегату як об'єкта автоматичного керування; математичне моделювання об'єкта керування на основі рівнянь теплового балансу; ідентифікація динамічних характеристик об'єкта; визначення передатних функцій основних ланок системи; параметричний синтез ПІ-регуляторів; аналіз стійкості систем автоматичного керування; оцінка якісних показників перехідних процесів; комп'ютерне моделювання роботи одноконтурної та каскадної систем керування.

Результати кваліфікаційної роботи. У роботі проаналізовано котельний агрегат як об'єкт автоматичного контролю і керування та визначено основні параметри, що підлягають контролю і регулюванню. Розроблено математичну модель об'єкта керування та отримано передатні функції основних динамічних ланок системи. Виконано синтез одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування температурою перегрітої пари. Проведено аналіз стійкості та якості роботи розроблених систем, який показав, що каскадна система має кращі динамічні властивості, менший час регулювання та менше перерегулювання порівняно з одноконтурною системою. Розроблено функціональну схему автоматизації котельного агрегату та виконано вибір технічних засобів автоматизації на базі обладнання Emerson і Schneider Electric.

Ключові слова: котельний агрегат, перегріта пара, автоматична система керування, ПІ-регулятор, математична модель, передатна функція, стійкість, перехідний процес, Emerson, Schneider Electric.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 58 pages of printed text, 12 figures, 7 tables, and 5 references.

Topic: "Synthesis of an Automatic Control System for a Boiler Unit".

Object of research: the technological process of superheated steam production in a boiler unit.

Aim of the work: synthesis of single-loop and cascade automatic control systems for controlling the temperature of superheated steam in a boiler unit.

Research methods: analysis of the technological process of the boiler unit as an automatic control object; mathematical modeling of the control object based on heat balance equations; identification of the dynamic characteristics of the object; determination of transfer functions of the main system elements; parametric synthesis of PI controllers; stability analysis of automatic control systems; evaluation of quality indicators of transient processes; computer simulation of single-loop and cascade control systems.

Results of the qualification work. The boiler unit was analyzed as an object of automatic monitoring and control, and the main parameters subject to monitoring and regulation were determined. A mathematical model of the control object was developed, and transfer functions of the main dynamic elements of the system were obtained. The synthesis of single-loop and cascade automatic control systems for the temperature of superheated steam was carried out. The stability and performance quality of the developed systems were analyzed. The analysis showed that the cascade system has better dynamic properties, a shorter settling time, and lower overshoot compared with the single-loop system. A functional automation diagram of the boiler unit was developed, and automation hardware based on Emerson and Schneider Electric equipment was selected.

Keywords: boiler unit, superheated steam, automatic control system, PI controller, mathematical model, transfer function, stability, transient process, Emerson, Schneider Electric.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	8
1	АНАЛІЗ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ ЯК ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ.....	11
	1.1 Призначення установки та суть процесу	11
	1.2 Характеристика продукції, сировини та реагентів.....	12
	1.3 Аналіз технологічної схеми котельного агрегату.....	14
	1.4 Технічна характеристика технологічного обладнання.....	17
	1.5 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання.....	18
	Висновки до розділу.....	21
2	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	22
	3.1 Обґрунтування вибору об’єкта автоматизації.....	22
	3.2 Визначення характеристик об’єкта автоматизації	24
	Висновки до розділу.....	30
3	СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	31
	3.1 Синтез одноконтурної системи автоматичного керування.....	31
	3.2 Синтез каскадної системи автоматичного керування.....	31
	3.3 Аналіз роботи розроблених систем автоматичного керування.....	37
	Висновки до розділу	42
4	РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	43
	4.1 Вибір технічних засобів автоматизації.....	43

					БР.АКП-12.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Синтез автоматичної системи керування котельним агрегатом	Літ.	Арк.	Акрюшів
							6	58
Розроб.		Козороз О.Г.				Група АКПз-22-1 ІФНТУНГ		
Перевір.		Чигур І.І.						
Реценз.		Шавранський М.В						
Н. Контр.		Кучмистенко О.В						
Затверд.		Лагойда А.І.						

4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації	49
Висновки до розділу.....	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	58

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ВСТУП

Сучасний розвиток теплоенергетики та промислового виробництва тісно пов'язаний із підвищенням ефективності, надійності та безпечності роботи технологічного обладнання. Особливе місце серед енергетичних установок займають котельні агрегати, які забезпечують виробництво пари необхідних параметрів для технологічних потреб, тепlopостачання та виробництва електричної енергії.

Котельний агрегат є складним теплоенергетичним об'єктом, у якому одночасно відбуваються процеси спалювання палива, теплообміну, пароутворення, перегрівання пари та відведення продуктів згорання. Ефективність його роботи значною мірою залежить від стабільності основних технологічних параметрів: температури перегрітої пари, рівня води у барабані, тиску пари, розрідження у топці, витрати палива, витрати повітря та витрати живильної води.

Порушення нормального режиму роботи котельного агрегату може призвести до зниження коефіцієнта корисної дії, перевитрати палива, погіршення якості пари, підвищення теплового навантаження на обладнання та виникнення аварійних ситуацій. Тому актуальним завданням є розроблення ефективної системи автоматичного керування, яка забезпечує стабільну роботу котлоагрегату в умовах змінного навантаження та дії зовнішніх збурень.

Особливістю котельного агрегату як об'єкта керування є значна теплова інерційність і наявність запізнення між зміною керуючої дії та реакцією вихідного параметра. Наприклад, зміна витрати палива не призводить до миттєвої зміни температури перегрітої пари, оскільки теплота повинна пройти через топку, димові гази та поверхні нагрівання. Така динаміка ускладнює процес регулювання та потребує правильного вибору структури системи керування і параметрів регуляторів.

Актуальність теми бакалаврської роботи полягає у необхідності синтезу системи автоматичного керування котельним агрегатом, яка забезпечить

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримання заданої температури перегрітої пари, підвищення стійкості технологічного процесу, зменшення впливу збурень і покращення якості регулювання.

Метою бакалаврської роботи є синтез та дослідження системи автоматичного керування котельним агрегатом з розробленням і порівнянням одноконтурної та каскадної структур регулювання.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виробництва перегрітої пари в котельному агрегаті.

Предметом дослідження є система автоматичного керування температурою перегрітої пари котельного агрегату.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- провести аналіз котельного агрегату як об'єкта автоматичного контролю і керування;
- дослідити технологічну схему котлоагрегату та визначити основні параметри контролю і регулювання;
- виконати математичне моделювання об'єкта керування;
- визначити передатні функції основних динамічних ланок системи;
- розробити структуру одноконтурної системи автоматичного керування;
- розробити структуру каскадної системи автоматичного керування;
- виконати синтез регуляторів для обох систем;
- дослідити стійкість і якість роботи розроблених систем;
- виконати порівняння одноконтурної та каскадної систем керування;
- вибрати технічні засоби автоматизації для реалізації системи керування;
- розробити функціональну схему автоматизації котельного агрегату.

Методи дослідження, використані у роботі, включають методи аналізу технологічних процесів, методи теорії автоматичного керування, математичне моделювання, ідентифікацію об'єкта керування, побудову передатних функцій, аналіз стійкості систем та оцінку якісних показників перехідних процесів.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичне значення роботи полягає у розробленні структури системи автоматичного керування котельним агрегатом, виборі технічних засобів автоматизації та обґрунтуванні доцільності використання каскадної системи керування для підвищення якості стабілізації температури перегрітої пари.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків та переліку посилань на джерела. Загальний обсяг – 58 сторінок.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ

1.1 Призначення установки та суть процесу

Котельні агрегати є важливою складовою енергетичних установок теплових електростанцій та промислових підприємств. Їх основне призначення полягає у виробництві перегрітої пари необхідних параметрів шляхом перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію. Отримана пара використовується для приводу турбін, технологічних процесів та теплопостачання.

Сучасний котельний агрегат являє собою складний теплоенергетичний комплекс, до складу якого входять топкова камера, барабан, пароперегрівачі, економайзер, повітропідігрівач, тягодуттєві механізми, трубна система, а також засоби автоматичного контролю та керування. Ефективність роботи котла значною мірою залежить від узгодженості роботи всіх елементів установки.

У даній роботі розглядається котельний агрегат типу ТП-100, який призначений для отримання перегрітої пари високого тиску при спалюванні пилувугільного палива, природного газу або мазуту. Котел працює за принципом природної циркуляції та має Т-подібне компонування газоходів.

Технологічний процес роботи котельного агрегату полягає у безперервному підведенні теплоти від продуктів згоряння палива до живильної води. У результаті теплообміну вода проходить декілька основних стадій: підігрівання живильної води, процес пароутворення, перегрівання пари до заданої температури.

Живильна вода після попереднього нагрівання в економайзері надходить у барабан котла, а звідти через опускні труби поступає до екранних поверхонь нагрівання. Під дією теплоти, що виділяється під час спалювання палива, частина води перетворюється у пароводяну суміш. У барабані відбувається сепарація пари та води, після чого насичена пара надходить до системи пароперегрівачів, де її температура підвищується до необхідного значення.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з характерних особливостей котельного агрегату як об'єкта автоматичного керування є наявність значної теплової інерційності та запізнення. Зміна подачі палива або повітря впливає на температуру та тиск пари лише через певний проміжок часу. Це ускладнює процес регулювання та висуває підвищені вимоги до систем автоматизації.

Крім цього, технологічний процес супроводжується великою кількістю взаємопов'язаних параметрів, серед яких: температура перегрітої пари, рівень води у барабані, тиск пари, розрідження у топці, витрата палива та повітря.

Порушення стабільності хоча б одного із зазначених параметрів може призвести до погіршення економічності роботи котла, зниження якості пари або виникнення аварійних ситуацій. Саме тому котельний агрегат є складним багатозв'язним об'єктом автоматичного контролю та керування.

1.2 Характеристика продукції, сировини та реагентів

Основним продуктом роботи котельного агрегату є перегріта водяна пара високих параметрів, яка використовується для виробництва електроенергії та забезпечення технологічних процесів. Якість пари безпосередньо впливає на надійність і довговічність турбінного обладнання та теплообмінних апаратів.

Основні характеристики сировини і готового продукту представлено в табл.1.1.

Перегріта пара повинна мати стабільні значення температури, тиску та мінімальний вміст домішок. Наявність вологи або солей у парі може викликати утворення накипу, корозію поверхонь нагрівання та пошкодження елементів турбіни.

Основною сировиною для роботи котельного агрегату є живильна вода. Для забезпечення надійної експлуатації обладнання вода проходить попередню хімічну підготовку та очищення. Якість живильної води визначається такими показниками: твердість, вміст заліза, концентрація розчиненого кисню, кислотність, наявність кремнієвих сполук, солевміст.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Технологічні характеристики сировини та продуктів котельного агрегату

Компонент технологічного процесу	Призначення	Характерні показники
Підготовлена живильна вода	Забезпечення безперервного процесу пароутворення	Мінімальний вміст домішок та солей
Хімічно очищена вода	Запобігання утворенню накипу та корозії	pH = 8,5–9,5
Вода після деаерації	Зменшення вмісту корозійно-активних газів	Вміст кисню до 20 мкг/кг
Перегріта водяна пара	Передача теплової енергії споживачам	Температура близько 545 °C
Насичена пара	Проміжний продукт процесу пароутворення	Низький рівень вологості
Паливо – кам'яне вугілля марки АШ	Джерело теплової енергії	Висока теплота згоряння
Теплотворна здатність палива	Визначає енергетичну ефективність процесу	24369 кДж/кг
Мінеральні домішки у паливі	Впливають на шлакоутворення	Зольність 22,4 %
Волога у паливі	Визначає додаткові теплові втрати	7,4 %
Горючі компоненти палива	Забезпечують процес горіння	Вміст вуглецю 55 %
Сірковмісні сполуки	Впливають на екологічні показники	До 3,2 %

Підвищений вміст домішок у воді призводить до утворення накипу на поверхнях нагрівання, погіршення теплообміну та збільшення витрат палива. Тому для живлення котлів використовують воду з мінімальним вмістом механічних і хімічних забруднень.

Як паливо в котлоагрегаті ТП-100 використовується вугілля марки АШ. Основними характеристиками палива є: вміст вуглецю, вологість, зольність, теплота згоряння, вміст сірки та азоту.

Важливим фактором ефективного спалювання палива є правильне співвідношення між подачею палива та повітря. Недостатня кількість повітря

призводить до неповного згоряння палива, а надлишок повітря викликає теплові втрати та зниження коефіцієнта корисної дії котла.

Як видно з табл. 1.1, до якості перегрітої та насиченої пари висуваються підвищені вимоги, оскільки її параметри безпосередньо впливають на ефективність та надійність роботи енергетичного обладнання. Наявність у парі механічних домішок, солей або надлишкової вологи може спричинити утворення накипу на поверхнях нагрівання, корозію трубопроводів та пошкодження лопаток турбіни.

Особливу увагу приділяють контролю солевмісту пари, оскільки перевищення допустимих значень призводить до погіршення теплообміну та зниження коефіцієнта корисної дії установки. Важливим показником також є концентрація вільної вуглекислоти та аміаку, які можуть викликати корозійні процеси у пароводяному тракті.

Для забезпечення необхідної якості пари на котлоагрегаті застосовуються системи хімічної підготовки живильної води, сепараційні пристрої барабана та автоматичні засоби контролю технологічних параметрів. Дотримання встановлених норм дозволяє підвищити надійність роботи котельного агрегату, зменшити теплові втрати та забезпечити стабільність технологічного процесу.

У процесі роботи котельного агрегату також використовуються допоміжні середовища та реагенти, необхідні для водопідготовки, очищення поверхонь нагрівання та забезпечення стабільності технологічного процесу.

1.3 Аналіз технологічної схеми котельного агрегату

Принципова технологічна схема котельного агрегату ТП-100 наведена на рис. 1.1. Вона включає основні елементи теплотехнічного обладнання, систему подачі палива та повітря, поверхні нагрівання, а також систему руху води та пари.

Котельний агрегат виконаний за Т-подібною схемою компоновання. У центральній частині розташована топкова камера, а по обидва боки — конвективні шахти з поверхнями нагрівання.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Процес роботи котла починається з подачі живильної води до економайзера, де вона попередньо нагрівається за рахунок теплоти димових газів. Після цього вода надходить у барабан котла.

Із барабана вода через систему опускних труб подається до екранних поверхонь топки. Внаслідок інтенсивного теплообміну частина води випаровується, утворюючи пароводяну суміш. У барабані відбувається розділення води та пари.

Насичена пара проходить через систему первинного та вторинного пароперегрівачів, де температура пари підвищується до заданого значення. Після перегрівання пара направляється до споживача.

Паливо подається до паливкових пристроїв топкової камери. Перед подачею до топки повітря проходить через повітропідігрівачі, що дозволяє підвищити ефективність процесу горіння та зменшити теплові втрати.

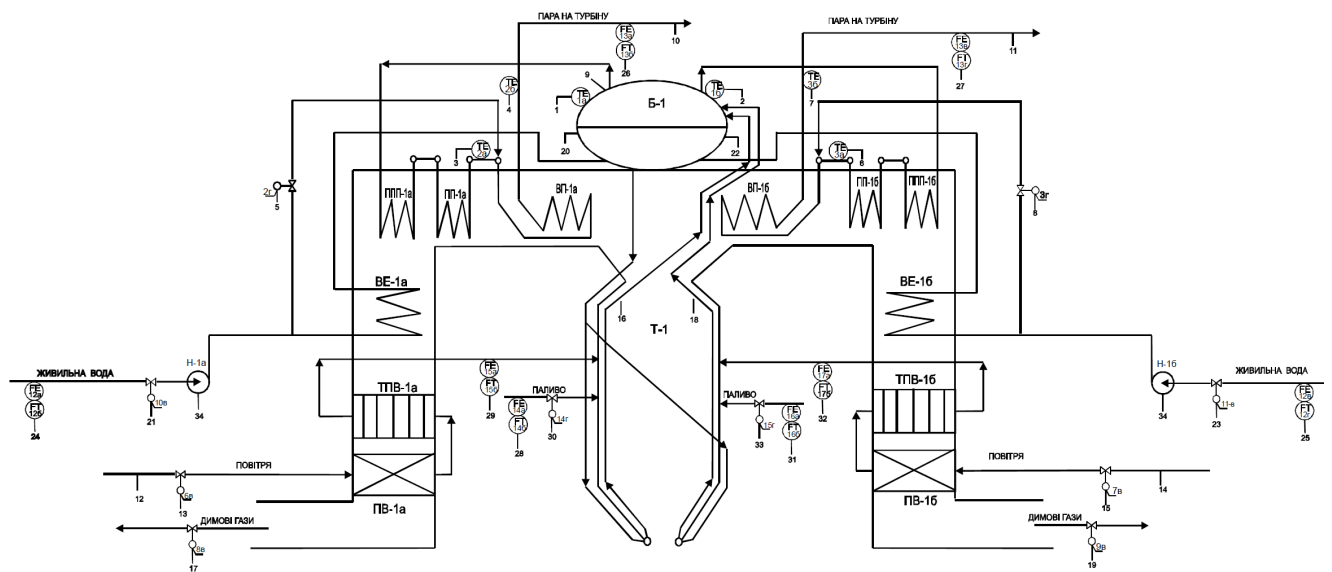


Рисунок 1.1 – Технологічна схема котельного агрегату

Димові гази після проходження поверхонь нагрівання віддають частину теплоти економайзеру та повітропідігрівачу, після чого видаляються через димову трубу.

Технологічна схема котельного агрегату побудована таким чином, щоб забезпечити безперервний процес виробництва перегрітої пари при мінімальних теплових втратах та максимальній ефективності використання палива. Усі елементи установки працюють у тісному взаємозв'язку, утворюючи єдину систему теплообміну, спалювання палива та циркуляції робочого середовища.

Особливістю котлоагрегату ТП-100 є двостороннє відведення димових газів із топкової камери та розміщення конвективних поверхонь нагрівання у двох окремих газоходах. Таке конструктивне рішення дозволяє рівномірніше розподіляти теплові потоки та підвищує ефективність теплопередачі.

Важливу роль у роботі котельного агрегату відіграють екранні поверхні нагрівання, які розташовані вздовж стін топкової камери. Вони забезпечують інтенсивне поглинання теплоти випромінювання факела та продуктів згорання. Завдяки цьому підвищується швидкість пароутворення і зменшується теплова напруженість стінок топки.

Для покращення економічних показників роботи котла у схемі передбачено використання водяного економайзера та повітропідігрівача. В економайзері відбувається попередній підігрів живильної води теплотою димових газів, що дозволяє зменшити витрати палива на утворення пари. Повітропідігрівач, у свою чергу, забезпечує нагрівання повітря перед його подачею до пальників, що сприяє інтенсифікації процесу горіння.

Під час роботи котлоагрегату важливе значення має стабільність процесу горіння у топковій камері. Для цього необхідно підтримувати оптимальне співвідношення між кількістю палива та повітря. Недостатня подача повітря призводить до неповного згорання палива та зростання втрат теплоти, а надлишкова кількість повітря викликає охолодження топки та зниження коефіцієнта корисної дії котла.

Система руху димових газів також має важливе значення для ефективної роботи установки. Гарячі продукти згорання послідовно проходять через поверхні нагрівання пароперегрівачів, економайзера та повітропідігрівача, поступово

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

віддаючи теплоту робочому середовищу. Після цього димові гази за допомогою димососів відводяться у димову трубу.

Аналіз технологічної схеми показує, що котельний агрегат характеризується значною кількістю внутрішніх зв'язків між окремими параметрами процесу. Зміна витрати палива впливає на температуру перегрітої пари, тиск у барабані, розрідження в топці та витрату повітря. Саме тому для забезпечення стійкої та економічної роботи установки необхідне застосування автоматичних систем контролю та регулювання.

Крім того, складність теплових і гідродинамічних процесів у котлоагрегаті зумовлює наявність значної інерційності об'єкта керування. Це проявляється у тому, що реакція системи на зміну керуючих впливів виникає не миттєво, а через певний проміжок часу. У зв'язку з цим система автоматичного керування повинна забезпечувати високу точність підтримання технологічних параметрів та стійкість роботи котла при змінних навантаженнях.

Аналіз технологічної схеми показує, що котельний агрегат є складною багатоконтурною системою з великою кількістю взаємопов'язаних параметрів. Основними регульованими величинами є: температура перегрітої пари, рівень води у барабані, тиск пари, розрідження у топці, витрата палива, витрата повітря.

Для забезпечення стабільної роботи котлоагрегату необхідно підтримувати тепловий і матеріальний баланси системи.

1.4 Технічна характеристика технологічного обладнання

Основним елементом котельного агрегату є топкова камера, в якій відбувається процес спалювання палива. Топка має призматичну форму та розділяється двосвітним екраном на дві напівтопки. Стіни топкової камери екрановані трубами, через які циркулює вода.

Для подачі паливоповітряної суміші використовуються комбіновані пальники, розташовані на бокових стінах топки. Конструкція пальників забезпечує стабільність факела та ефективне змішування палива з повітрям.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Барабан котла призначений для сепарації пароводяної суміші та накопичення запасу води. Усередині барабана встановлені сепараційні пристрої циклонного типу, які забезпечують відокремлення пари від води.

Трубна система котла включає: екранні труби, водопровідні труби, паропроводи, колектори, циркуляційні контури.

Важливим елементом установки є пароперегрівач, призначений для підвищення температури пари. Котлоагрегат має первинний та вторинний пароперегрівачі, які складаються з конвективних та радіаційних поверхонь нагрівання.

Для підвищення коефіцієнта корисної дії використовується водяний економайзер, у якому відбувається підігрів живильної води теплотою димових газів.

Повітропідігрівач забезпечує нагрівання повітря перед його подачею у топку. Це сприяє покращенню процесу горіння та зменшенню витрат палива.

Технічні характеристики обладнання визначають динамічні властивості об'єкта керування та впливають на вибір структури системи автоматизації.

1.5 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання

Основною задачею системи автоматичного керування котельним агрегатом є забезпечення стабільної та безпечної роботи обладнання при мінімальних витратах палива і максимальній енергоефективності.

До основних параметрів, які підлягають автоматичному контролю та регулюванню, належать:

Рівень води у барабані

Рівень води у барабані є одним із найважливіших параметрів роботи котла. Зниження рівня нижче допустимого значення може викликати перегрів поверхонь нагрівання та аварійне пошкодження труб. Надмірне підвищення рівня небезпечно потраплянням вологи до пароперегрівача і турбіни.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Номінальний рівень води підтримується автоматично за допомогою системи регулювання живлення котла.

Температура перегрітої пари

Температура перегрітої пари повинна підтримуватись у вузьких допустимих межах. Її відхилення негативно впливають на роботу турбіни та можуть викликати пошкодження обладнання.

Регулювання температури здійснюється шляхом зміни теплового навантаження або керування подачею охолоджувального середовища.

Розрідження у топці

Підтримання необхідного розрідження у топці забезпечує нормальне видалення продуктів згоряння та запобігає прориву димових газів у приміщення котельні.

Регулювання розрідження виконується зміною продуктивності димососів.

Тиск повітря

Підтримання необхідного тиску повітря забезпечує стабільність процесу горіння та повне згоряння палива. Недостатня подача повітря призводить до втрат теплоти та утворення шкідливих продуктів згоряння.

Витрата палива та живильної води

Контроль витрати палива і живильної води необхідний для підтримання енергетичного та матеріального балансів котельного агрегату.

Основні параметри контролю та регулювання наведені у табл. 1.2.

Дані, наведені у табл. 1.2, характеризують основні параметри технологічного процесу, які підлягають автоматичному контролю та регулюванню під час роботи котельного агрегату. Підтримання цих величин у встановлених межах забезпечує стабільність процесу пароутворення, безпечну експлуатацію обладнання та підвищення енергоефективності установки.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Основні параметри контролю та регулювання котлоагрегату

Параметр	Одиниці вимірювання	Нормоване значення
Температура перегрітої пари	°C	545 ± 10
Рівень води у барабані	м	0,7 ± 0,0075
Розрідження у топці	кПа	0,6 ± 0,001
Тиск повітря	кПа	0,15–1,1
Витрата палива	м³/с	160
Тиск перегрітої пари	кПа	140
Температура барабана	°C	300
Витрата води	м³/с	40

Одним із найбільш важливих параметрів є температура перегрітої пари, оскільки її відхилення від номінального значення може призвести до зниження економічності роботи турбіни та перегріву елементів паропроводу. Не менш важливим є підтримання рівня води у барабані котла, від якого залежить надійність циркуляції води в екранних трубах і безпечний режим роботи котлоагрегату.

Контроль розрідження в топці необхідний для забезпечення стабільного відведення продуктів згоряння та запобігання потраплянню димових газів у виробниче приміщення. Регулювання тиску повітря дозволяє підтримувати оптимальні умови горіння палива та забезпечує необхідний коефіцієнт надлишку повітря.

Також важливими параметрами є витрата палива, тиск перегрітої пари та витрата живильної води, оскільки вони безпосередньо визначають теплове навантаження котла та продуктивність установки. Для контролю зазначених параметрів у системі автоматизації використовуються датчики температури,

тиску, витрати, рівня та розрідження, сигнали від яких надходять до регулюючих пристроїв і систем керування.

Ефективне автоматичне регулювання перелічених параметрів забезпечує економічність, безпеку та надійність роботи котельного агрегату.

Висновки до розділу

У даному розділі було проведено аналіз котельного агрегату ТП-100 як об'єкта автоматичного контролю та керування. Розглянуто призначення та принцип роботи котла, досліджено основні технологічні процеси та характеристики використовуваного обладнання.

Встановлено, що котельний агрегат є складним багатозв'язним динамічним об'єктом із значною тепловою інерційністю та запізненням. Основними параметрами, які потребують автоматичного регулювання, є температура перегрітої пари, рівень води у барабані, розрідження у топці, тиск повітря та витрата палива.

Аналіз технологічної схеми та характеристик обладнання показав необхідність застосування сучасної системи автоматичного керування, яка забезпечить стабільність технологічного процесу, підвищення енергоефективності та безпечну експлуатацію котельного агрегату.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Обґрунтування вибору об'єкта автоматизації

Котельний агрегат є складним теплоенергетичним об'єктом, у якому одночасно відбуваються процеси спалювання палива, теплообміну, пароутворення, перегрівання пари та відведення продуктів згоряння. Його робота характеризується значною кількістю взаємопов'язаних технологічних параметрів, зміна кожного з яких може впливати на загальну ефективність, безпечність та надійність функціонування установки.

У попередньому розділі було встановлено, що до основних параметрів, які потребують автоматичного контролю та регулювання, належать температура перегрітої пари, рівень води у барабані, розрідження у топці, тиск повітря, витрата палива та витрата живильної води. Однак для синтезу системи автоматичного керування необхідно вибрати основний регульований параметр, за яким буде оцінюватися якість роботи системи.

У даній роботі як основний об'єкт автоматизації приймається канал регулювання температури перегрітої пари котельного агрегату. Такий вибір пояснюється тим, що температура перегрітої пари є одним із найважливіших показників якості роботи котла. Її відхилення від заданого значення може призвести до зниження економічності роботи енергетичної установки, погіршення умов роботи турбіни та підвищення теплового навантаження на елементи паропроводу.

Температура перегрітої пари залежить від багатьох факторів: витрати палива, кількості повітря, теплового навантаження котла, витрати живильної води, температури димових газів та стану поверхонь нагрівання. Тому даний параметр є зручним для дослідження з погляду автоматичного керування, оскільки він відображає загальний тепловий стан котлоагрегату.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З погляду теорії автоматичного керування котельний агрегат у каналі “витрата палива — температура перегрітої пари” можна розглядати як інерційний об’єкт із транспортним запізненням. Це пов’язано з тим, що зміна подачі палива не викликає миттєвої зміни температури пари. Спочатку змінюється інтенсивність горіння в топці, потім теплота передається димовим газам і поверхням нагрівання, після чого змінюється температура пари на виході з пароперегрівача.

Для такого об’єкта характерні такі властивості:

- значна теплова інерційність;
- наявність запізнення у реакції на керуючу дію;
- вплив зовнішніх збурень;
- взаємозв’язок між параметрами горіння та пароутворення;
- нелінійність характеристик при значних змінах навантаження.

У роботі передбачається дослідити два варіанти системи автоматичного керування температурою перегрітої пари:

1. Одноконтурну систему автоматичного керування;
2. Каскадну систему автоматичного керування.

Одноконтурна система розглядається як базовий варіант. У такій системі регулятор безпосередньо формує керуючу дію за відхиленням температури перегрітої пари від заданого значення. Перевагою цієї структури є простота реалізації, однак при наявності значного запізнення вона може мати недостатню швидкодію.

Каскадна система керування використовується для покращення динамічних властивостей системи. У ній передбачається наявність зовнішнього контуру регулювання температури перегрітої пари та внутрішнього контуру регулювання витрати палива. Внутрішній контур швидше реагує на зміни в паливному каналі, тому каскадна структура дозволяє зменшити вплив збурень і підвищити якість регулювання.

Структурно об’єкт керування можна подати у вигляді сукупності окремих динамічних ланок: виконавчого механізму, паливного каналу, теплообмінної частини котла, вимірювальних перетворювачів температури та витрати. Такий

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

підхід дозволяє виконати подальший синтез регуляторів для обох варіантів системи керування.

У загальному вигляді процес формування температури перегрітої пари можна описати рівнянням теплового балансу:

$$G_s \cdot (i_{pp} - i_{fw}) = B_f \cdot Q_n^p \cdot \eta_k, \quad (2.1)$$

де

G_s — витрата пари, кг/с;

i_{pp} — ентальпія перегрітої пари, кДж/кг;

i_{fw} — ентальпія живильної води, кДж/кг;

B_f — витрата палива, кг/с або м³/с;

Q_n^p — нижча теплота згоряння палива, кДж/кг;

η_k — коефіцієнт корисної дії котельного агрегату.

Після лінеаризації в околі робочого режиму зв'язок між зміною витрати палива та температурою перегрітої пари можна подати у вигляді передавальної функції. Саме така модель буде використана для синтезу систем автоматичного керування.

2.2 Визначення характеристик об'єкта автоматизації

Для подальшого синтезу системи керування необхідно визначити математичну модель об'єкта. Оскільки котельний агрегат має значну теплову інерційність, його динамічні властивості доцільно описувати передавальною функцією аперіодичної ланки першого порядку із запізненням.

Загальний вигляд передавальної функції об'єкта керування приймається таким:

$$W_o(p) = \frac{K_o \cdot e^{-\tau_o p}}{T_o p + 1}, \quad (2.2)$$

де

K_o — коефіцієнт підсилення об'єкта;

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

T_o — стала часу об'єкта, с;

τ_o — час запізнення, с;

p — оператор Лапласа.

Коефіцієнт підсилення визначається за відношенням зміни вихідного параметра до зміни вхідної дії:

$$K_o = \frac{\Delta t_{pp}}{\Delta B_f}, \quad (2.3)$$

де

Δt_{pp} — зміна температури перегрітої пари;

ΔB_f — зміна витрати палива.

Стала часу визначається за кривою розгону об'єкта як час, протягом якого вихідна величина досягає приблизно 63 % від свого усталеного приросту після завершення ділянки запізнення:

$$T_o = t_{0.632} - \tau_o. \quad (2.4)$$

Оскільки в реальних умовах експлуатації котельного агрегату реакція температури пари на зміну витрати палива є повільною, для подальших розрахунків приймається така ідентифікована передавальна функція основного об'єкта:

$$W_t(p) = \frac{1.85 \cdot e^{-35p}}{220p + 1}. \quad (2.5)$$

Ця передавальна функція описує канал від зміни витрати палива до зміни температури перегрітої пари. Значення сталої часу $T=220$ с відображає значну теплову інерційність котла, а запізнення $\tau = 35$ с враховує час, необхідний для проходження теплового впливу від топки до пароперегрівача.

Для використання в розрахунках стійкості та побудови частотних характеристик запізнення можна апроксимувати дробово-раціональним виразом Паде першого порядку:

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \frac{\tau p}{2}}{1 + \frac{\tau p}{2}}. \quad (2.6)$$

Тоді для $\tau = 35$ с маємо:

$$e^{-35p} \approx \frac{1 - 17.5p}{1 + 17.5p}. \quad (2.7)$$

Отже, апроксимована передавальна функція об'єкта матиме вигляд:

$$W_t^*(p) = \frac{1.85(1 - 17.5p)}{(220p + 1)(17.5p + 1)}. \quad (2.8)$$

Для одноконтурної системи керування необхідно врахувати не лише теплову частину котла, а й динаміку виконавчого механізму, який змінює подачу палива. Виконавчий механізм приймається у вигляді аперіодичної ланки першого порядку:

$$W_v(p) = \frac{K_v}{T_v p + 1}. \quad (2.9)$$

Для подальших розрахунків приймаємо:

$$W_v(p) = \frac{0.95}{8p + 1}. \quad (2.10)$$

Тоді передавальна функція об'єкта для одноконтурної системи за каналом “керуючий сигнал — температура перегрітої пари” визначається як добуток передавальних функцій виконавчого механізму та теплової частини котла:

$$W_{1c}(p) = W_v(p) \cdot W_t(p). \quad (2.11)$$

Після підстановки отримаємо:

$$W_{1c}(p) = \frac{0.95}{8p + 1} \cdot \frac{1.85e^{-35p}}{220p + 1}, \quad (2.12)$$

$$W_{1c}(p) = \frac{1.76e^{-35p}}{(8p + 1)(220p + 1)}. \quad (2.13)$$

Ця функція буде використана для синтезу одноконтурної системи автоматичного керування температурою перегрітої пари.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для каскадної системи керування об'єкт необхідно подати у вигляді двох послідовно з'єднаних частин: внутрішнього швидкодіючого каналу та зовнішнього інерційного каналу. Внутрішній контур відповідає за регулювання витрати палива, а зовнішній — за регулювання температури перегрітої пари.

Передавальна функція внутрішнього об'єкта, що описує зміну витрати палива під дією керуючого сигналу, приймається у вигляді:

$$W_f(p) = \frac{K_f}{T_f p + 1}. \quad (2.14)$$

Для паливного каналу приймаємо:

$$W_f(p) = \frac{0.98}{12p + 1}. \quad (2.15)$$

Ця ланка характеризує динаміку паливоподачі та може бути використана для синтезу внутрішнього регулятора каскадної системи.

Передавальна функція зовнішнього об'єкта каскадної системи описує залежність температури перегрітої пари від витрати палива (2.5).

Таким чином, повна передавальна функція об'єкта для каскадної системи без урахування регуляторів дорівнює:

$$W_{cs}(p) = W_f(p) \cdot W_t(p). \quad (2.16)$$

Після підстановки:

$$W_{cs}(p) = \frac{0.98}{12p + 1} \cdot \frac{1.85e^{-35p}}{220p + 1}, \quad (2.17)$$

$$W_{cs}(p) = \frac{1.81e^{-35p}}{(12p + 1)(220p + 1)}. \quad (2.18)$$

Для моделювання вимірювальних каналів необхідно врахувати динаміку датчиків. Датчик температури перегрітої пари подається аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{mt}(p) = \frac{K_{mt}}{T_{mt} p + 1}. \quad (2.19)$$

Приймаємо:

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{mt}(p) = \frac{1}{5p + 1}. \quad (2.20)$$

Датчик витрати палива для внутрішнього контуру каскадної системи описується передавальною функцією:

$$W_{mf}(p) = \frac{K_{mf}}{T_{mf}p + 1}. \quad (2.21)$$

Приймаємо:

$$W_{mf}(p) = \frac{1}{2p + 1}. \quad (2.22)$$

Оскільки на температуру перегрітої пари впливають зовнішні збурення, для повнішого аналізу необхідно врахувати канал збурення. Основним збуренням для котельного агрегату є зміна парового навантаження або витрати живильної води. При збільшенні навантаження температура перегрітої пари, як правило, зменшується, тому коефіцієнт підсилення каналу збурення має від'ємний знак.

Передавальна функція за каналом збурення приймається у вигляді:

$$W_d(p) = \frac{K_d e^{-\tau_d p}}{T_d p + 1}. \quad (2.23)$$

Для подальшого аналізу приймаємо:

$$W_d(p) = \frac{-1.10 e^{-45p}}{180p + 1}. \quad (2.24)$$

Ця функція описує вплив зміни навантаження котла на температуру перегрітої пари.

Узагальнена математична модель об'єкта керування з урахуванням керуючої дії та збурення може бути записана у вигляді:

$$\Delta t_{pp}(p) = W_t(p)\Delta B_f(p) + W_d(p)\Delta G_s(p), \quad (2.25)$$

де

$\Delta t_{pp}(s)$ — зміна температури перегрітої пари;

$\Delta B_f(p)$ — зміна витрати палива;

$\Delta G_p(p)$ — зміна парового навантаження котла.

Для одноконтурної системи структурна модель має вигляд:

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta t_{pp}(p) = W_{1c}(p)\Delta u(p) + W_d(p)\Delta G_s(p), \quad (2.26)$$

де

$\Delta u(p)$ — зміна керуючого сигналу регулятора.

Для каскадної системи математична модель поділяється на внутрішній та зовнішній канали:

$$\Delta B_f(p) = W_f(p)\Delta u_f(p), \quad (2.27)$$

$$\Delta t_{pp}(p) = W_t(p)\Delta B_f(p) + W_d(p)\Delta G_s(p), \quad (2.28)$$

де

$\Delta u_f(p)$ — керуючий сигнал внутрішнього регулятора витрати палива.

Основні передавальні функції, необхідні для подальшого синтезу систем автоматичного керування, наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Передавальні функції елементів об'єкта керування

Позначення	Опис динамічної ланки	Передавальна функція
$W_t(p)$	Канал “витрата палива — температура перегрітої пари”	$\frac{1.85e^{-35p}}{220p + 1}$
$W_t^*(p)$	Апроксимована модель теплової частини котла	$\frac{1.85(1 - 17.5p)}{(220p + 1)(17.5p + 1)}$
$W_v(p)$	Виконавчий механізм подачі палива	$\frac{0.95}{8p + 1}$
$W_{1c}(p)$	Об'єкт для одноконтурної системи	$\frac{1.76e^{-35p}}{(8p + 1)(220p + 1)}$
$W_f(p)$	Паливний канал внутрішнього контуру	$\frac{0.98}{12p + 1}$
$W_{cs}(p)$	Об'єкт для каскадної системи	$\frac{1.81e^{-35p}}{(12p + 1)(220p + 1)}$
$W_{mt}(p)$	Датчик температури перегрітої пари	$\frac{1}{5p + 1}$
$W_d(p)$	Датчик витрати палива	$\frac{1}{2p + 1}$
$W_d(p)$	Канал збурення за навантаженням	$\frac{-1.10e^{-45p}}{180p + 1}$

Наведені передавальні функції дозволяють перейти до наступного етапу роботи — синтезу регуляторів для одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування. Для одноконтурної системи основною буде передавальна функція $W_{lc}(p)$, а для каскадної — окремо функції $W_f(p)$ та $W_t(p)$, що описують внутрішній і зовнішній контури регулювання.

Висновки до розділу

У даному розділі виконано обґрунтування вибору об'єкта автоматизації та визначено математичні характеристики котельного агрегату як об'єкта автоматичного керування. Як основний регульований параметр обрано температуру перегрітої пари, оскільки вона суттєво впливає на ефективність, надійність і безпечність роботи котлоагрегату.

Встановлено, що канал “витрата палива — температура перегрітої пари” доцільно описувати аперіодичною ланкою першого порядку із запізненням. Для подальшого синтезу систем керування отримано передавальні функції теплової частини котла, виконавчого механізму, паливного каналу, вимірювальних перетворювачів та каналу збурення.

Окремо визначено математичні моделі для двох варіантів системи керування: одноконтурної та каскадної. Одноконтурна система буде синтезуватись за повною передавальною функцією об'єкта, а каскадна система — з урахуванням внутрішнього контуру регулювання витрати палива та зовнішнього контуру регулювання температури перегрітої пари.

Отримані математичні моделі є основою для подальшого синтезу регуляторів, дослідження стійкості та аналізу якості перехідних процесів систем автоматичного керування котельним агрегатом.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

3.1 Синтез одноконтурної системи автоматичного керування

На основі математичної моделі, отриманої у розділі 2, для синтезу системи автоматичного керування як основний регульований параметр прийнято температуру перегрітої пари (t_{pp}). Керуючою дією є зміна подачі палива до топки котельного агрегату, а основним збуренням — зміна парового навантаження котла.

Одноконтурна система автоматичного керування є найпростішою структурою регулювання [1]. У такій системі фактичне значення температури перегрітої пари порівнюється із заданим значенням, після чого регулятор формує керуючий сигнал на виконавчий механізм подачі палива.

Структурна схема одноконтурної системи автоматичного керування температурою перегрітої пари наведена на рис. 3.1.

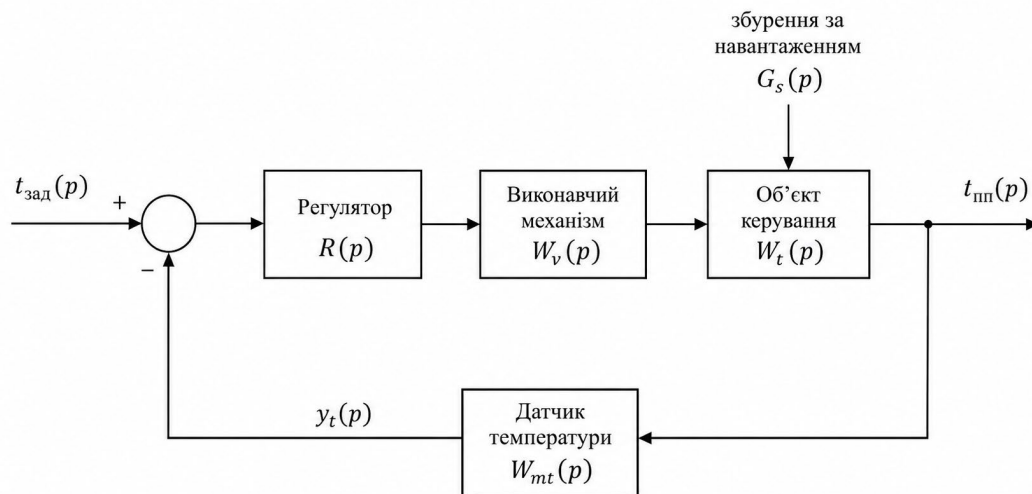


Рисунок 3.1 – Структурна схема одноконтурної системи автоматичного керування температурою перегрітої пари

У даній структурі сигнал завдання ($t_{zad}(p)$) надходить на елемент порівняння, де формується похибка регулювання:

$$e(p) = t_{zad}(p) - y_t(p)$$

де

$e(p)$ — сигнал похибки регулювання;

$t_{zad}(p)$ — задане значення температури перегрітої пари;

$y_t(p)$ — вимірне значення температури перегрітої пари.

Сигнал похибки надходить на регулятор $R(p)$, який формує керуючу дію для виконавчого механізму. Передавальна функція об'єкта для одноконтурної системи має вигляд:

$$W_{lc}(p) = \frac{1.76e^{-35p}}{(8p+1)(220p+1)}. \quad (3.1)$$

У цій передавальній функції враховано динаміку виконавчого механізму та теплову інерційність котельного агрегату. Наявність множника e^{-35p} свідчить про запізнення об'єкта, яке є характерним для теплових процесів у котлах.

Для регулювання температури перегрітої пари доцільно застосувати ПІ-регулятор. Використання пропорційної складової забезпечує необхідну швидкодію системи, а інтегральна складова усуває статичну похибку в усталеному режимі.

Передавальна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$R_{lc}(p) = K_{r1} \left(1 + \frac{1}{T_{il}p} \right), \quad (3.2)$$

або

$$R_{lc}(p) = K_{r1} \frac{T_{il}p + 1}{T_{il}p}, \quad (3.3)$$

де

K_{r1} — коефіцієнт підсилення регулятора;

T_{il} — час інтегрування регулятора.

Для попереднього налаштування регулятора використано параметри ідентифікованої моделі об'єкта. З урахуванням інерційності та запізнення об'єкта приймаємо такі параметри ПІ-регулятора: $K_{r1}=2.2$, $T_{il}=130$ с. Тоді передавальна функція регулятора одноконтурної системи набуває вигляду:

$$R_{lc}(p) = 2.2 \left(1 + \frac{1}{130p} \right). \quad (3.4)$$

Передавальна функція розімкненої одноконтурної системи визначається як добуток передавальних функцій регулятора, об'єкта керування та датчика температури:

$$W_{op1}(p) = R_{lc}(p) \cdot W_{lc}(p) \cdot W_{mt}(p). \quad (3.5)$$

З урахуванням

$$W_{mt}(p) = \frac{1}{5p + 1},$$

маємо:

$$W_{op1}(p) = 2.2 \left(1 + \frac{1}{130p} \right) \cdot \frac{1.76e^{-35p}}{(8p + 1)(220p + 1)} \cdot \frac{1}{5p + 1}. \quad (3.6)$$

Передавальна функція замкненої одноконтурної системи за каналом завдання має вигляд:

$$W_{1lc}(p) = \frac{R_{lc}(p)W_{lc}(p)}{1 + R_{lc}(p)W_{lc}(p)W_{mt}(p)}. \quad (3.7)$$

Для аналізу впливу збурення використовується передавальна функція за каналом збурення:

$$W_{1d1}(p) = \frac{W_d(p)}{1 + R_{lc}(p)W_{lc}(p)W_{mt}(p)}. \quad (3.8)$$

де

$$W_d(p) = \frac{-1.10e^{-45p}}{180p + 1}.$$

Отже, синтезована одноконтурна система дозволяє підтримувати температуру перегрітої пари на заданому рівні, однак через значну інерційність об'єкта її швидкодія є обмеженою. Тому для покращення якості регулювання доцільно розглянути каскадну систему керування.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Синтез каскадної системи автоматичного керування

Каскадна система автоматичного керування застосовується для підвищення якості регулювання об'єктів із великою інерційністю та запізненням. У порівнянні з одноконтурною системою вона містить два взаємопов'язані контури: зовнішній і внутрішній.

У даній роботі зовнішній контур призначений для регулювання температури перегрітої пари, а внутрішній — для регулювання витрати палива. Така структура дозволяє швидше компенсувати збурення, які виникають у паливному каналі, ще до того, як вони суттєво вплинуть на температуру перегрітої пари.

Структурна схема каскадної системи автоматичного керування наведена на рис. 3.2.

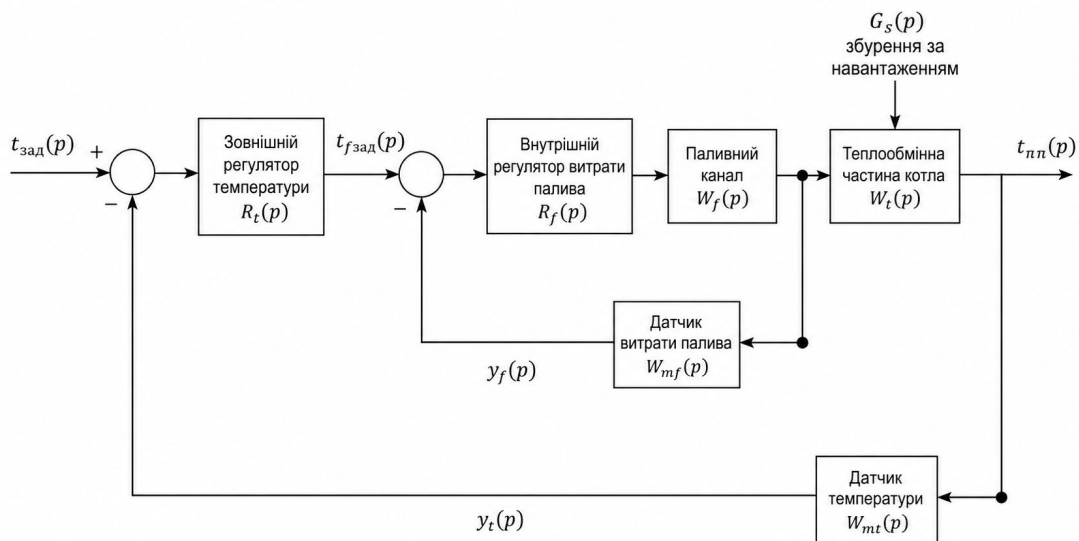


Рисунок 3.2 – Структурна схема каскадної системи автоматичного керування температурою перегрітої пари

У каскадній системі зовнішній регулятор температури формує не безпосередньо керуючий сигнал на виконавчий механізм, а завдання для внутрішнього регулятора витрати палива. Внутрішній контур забезпечує підтримання витрати палива на рівні, який необхідний для стабілізації температури перегрітої пари.

Передавальна функція паливного каналу, що використовується у внутрішньому контурі, має вигляд:

$$W_f(p) = \frac{0.98}{12p + 1}. \quad (3.9)$$

Для внутрішнього контуру вибираємо ПІ-регулятор витрати палива:

$$R_f(p) = K_{rf} \left(1 + \frac{1}{T_{if} p} \right)$$

Оскільки паливний канал має значно меншу інерційність, ніж тепловий канал котла, внутрішній регулятор повинен бути налаштований на вищу швидкодію. Приймаємо такі параметри:

$K_{rf}=1.4$, $T_{if}=12$;с.

Тоді передавальна функція внутрішнього регулятора має вигляд:

$$R_f(p) = K_{rf} \left(1 + \frac{1}{T_{if} p} \right). \quad (3.10)$$

Передавальна функція замкненого внутрішнього контуру визначається за виразом:

$$W_{2f}(p) = \frac{R_f(p)W_f(p)}{1 + R_f(p)W_f(p)W_{mf}(p)}. \quad (3.11)$$

де

$W_{mf}(p) = \frac{1}{2p + 1}$ — передавальна функція датчика витрати палива.

Після налаштування внутрішнього контуру виконується синтез зовнішнього контуру регулювання температури перегрітої пари. Передавальна функція теплової частини котла має вигляд:

$$W_t(p) = \frac{1.85e^{-35p}}{220p + 1}. \quad (3.12)$$

Для зовнішнього контуру також застосовується ПІ-регулятор, оскільки він забезпечує відсутність статичної похибки та достатню стійкість при регулюванні інерційного теплового об'єкта.

Передавальна функція зовнішнього регулятора температури:

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_t(p) = K_{rt} \left(1 + \frac{1}{T_{it}p} \right). \quad (3.13)$$

З урахуванням того, що внутрішній контур частково компенсує інерційність паливного каналу, зовнішній регулятор можна налаштувати м'якше, ніж у випадку одноконтурної системи. Приймаємо: $K_{rt}=2.0$, $T_{it}=150$ с.

Отже,

$$R_t(p) = 2.0 \left(1 + \frac{1}{150p} \right). \quad (3.14)$$

Передавальна функція замкненої каскадної системи за каналом завдання може бути записана у вигляді:

$$W_{1cp}(p) = \frac{R_t(p)\Phi_f(p)W_t(p)}{1 + R_t(p)\Phi_f(p)W_t(p)W_{mt}(p)}. \quad (3.15)$$

де

$$W_{mt}(p) = \frac{1}{5p+1} \text{ — передавальна функція датчика температури перегрітої пари.}$$

пари.

Передавальна функція каскадної системи за каналом збурення визначається як:

$$W_{1dcp}(p) = \frac{W_d(p)}{1 + R_t(p)\Phi_f(p)W_t(p)W_{mt}(p)}. \quad (3.16)$$

Узагальнені параметри регуляторів для одноконтурної та каскадної систем наведено в табл. 3.1.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Параметри налаштування регуляторів систем автоматичного керування

Система керування	Регулятор	Передавальна функція	Параметри налаштування
Одноконтурна САК	ПІ-регулятор температури	$R_{1c}(p) = K_{r1} \left(1 + \frac{1}{T_{i1}p} \right)$	$K_{r1}=2.2$ $T_{i1}=130$ с
Каскадна САК	Зовнішній регулятор температури	ПІ- $R_t(p) = K_{rt} \left(1 + \frac{1}{T_{it}p} \right)$	$K_{rt}=2.0$ $T_{it}=150$ с
Каскадна САК	Внутрішній регулятор палива	ПІ-вирати $R_f(p) = K_{rf} \left(1 + \frac{1}{T_{if}p} \right)$	$K_{rf}=1.4$ $T_{if}=12$ с

Каскадна система є складнішою за структурою, однак вона має важливу перевагу: внутрішній контур швидко реагує на зміну витрати палива, що дозволяє зменшити вплив збурень на температуру перегрітої пари.

3.3 Аналіз роботи розроблених систем автоматичного керування

Після синтезу регуляторів необхідно виконати аналіз роботи одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування. Основними етапами такого аналізу є:

- дослідження систем на стійкість;
- побудова перехідних характеристик;
- визначення якісних показників регулювання;
- порівняння роботи систем при дії збурень.

Для дослідження перехідних процесів на вхід системи подається одинична зміна завдання температури перегрітої пари. Перехідна характеристика одноконтурної системи наведена на рис. 3.3.

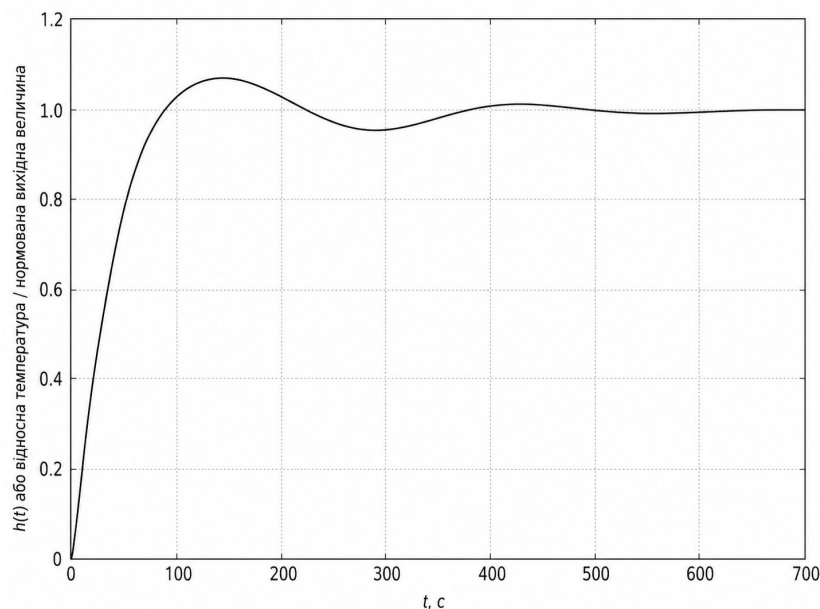


Рисунок 3.3 – Перехідна характеристика одноконтурної системи автоматичного керування

Аналіз перехідної характеристики показує, що одноконтурна система забезпечує вихід температури перегрітої пари на задане значення без статичної похибки. Проте через значну інерційність об'єкта процес регулювання є відносно повільним. Також у перехідному процесі можливе незначне перерегулювання, що пов'язано з наявністю запізнення в об'єкті керування.

Перехідна характеристика каскадної системи автоматичного керування наведена на рис. 3.4.

Порівняння рис. 3.3 і рис. 3.4 показує, що каскадна система має кращі динамічні властивості. Завдяки наявності внутрішнього контуру регулювання витрати палива зменшується час перехідного процесу та величина перерегулювання. Крім того, каскадна система ефективніше компенсує збурення, які виникають у паливному каналі.

Для перевірки стійкості системи використовується частотний критерій Найквіста. Відповідно до цього критерію, замкнена система є стійкою, якщо амплітудно-фазова частотна характеристика розімкненої системи не охоплює критичну точку $(-1; j0)$.

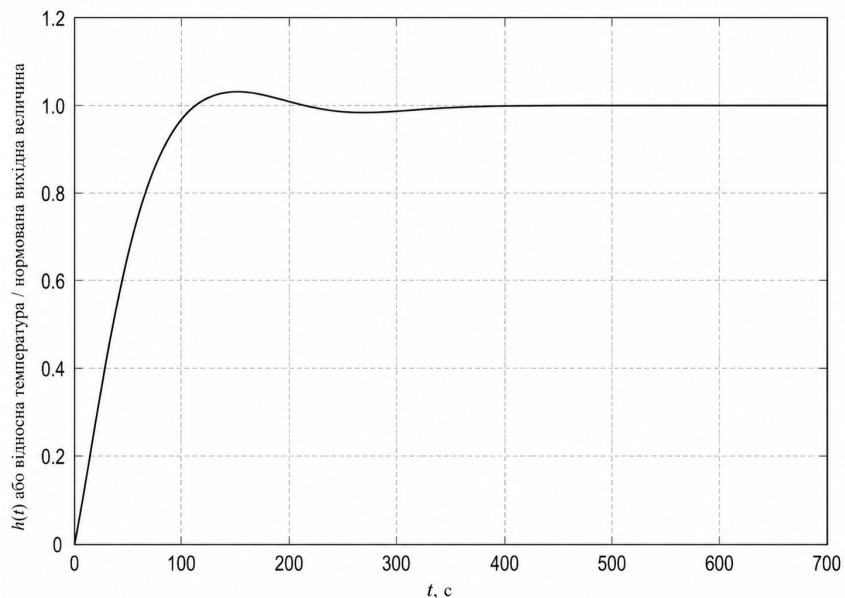


Рисунок 3.4 – Перехідна характеристика каскадної системи автоматичного керування

Для одноконтурної системи розімкнена передавальна функція має вигляд:

$$W_{opl}(p) = R_{lc}(p) W_{lc}(p) W_m(p). \quad (3.17)$$

Амплітудно-фазова частотна характеристика одноконтурної системи наведена на рис. 3.5.

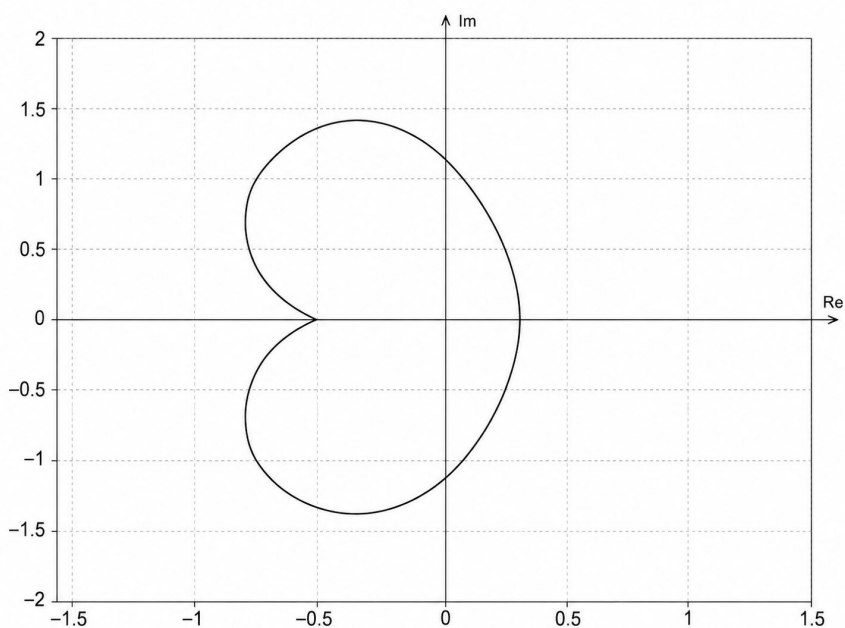


Рисунок 3.5 – Амплітудно-фазова частотна характеристика одноконтурної системи

З рис. 3.5 видно, що годограф розімкненої системи не охоплює критичну точку $((-1; j0))$. Отже, синтезована одноконтурна система є стійкою. Проте запас стійкості є обмеженим, що пояснюється значним запізненням та інерційністю об'єкта керування.

Для каскадної системи розімкнена передавальна функція зовнішнього контуру може бути подана у вигляді:

$$W_{\text{орсп}}(p) = R_t(p) \{ W_{li}(p) W_i(p) W_m \} (p). \quad (3.18)$$

Амплітудно-фазова частотна характеристика каскадної системи наведена на рис. 3.6.

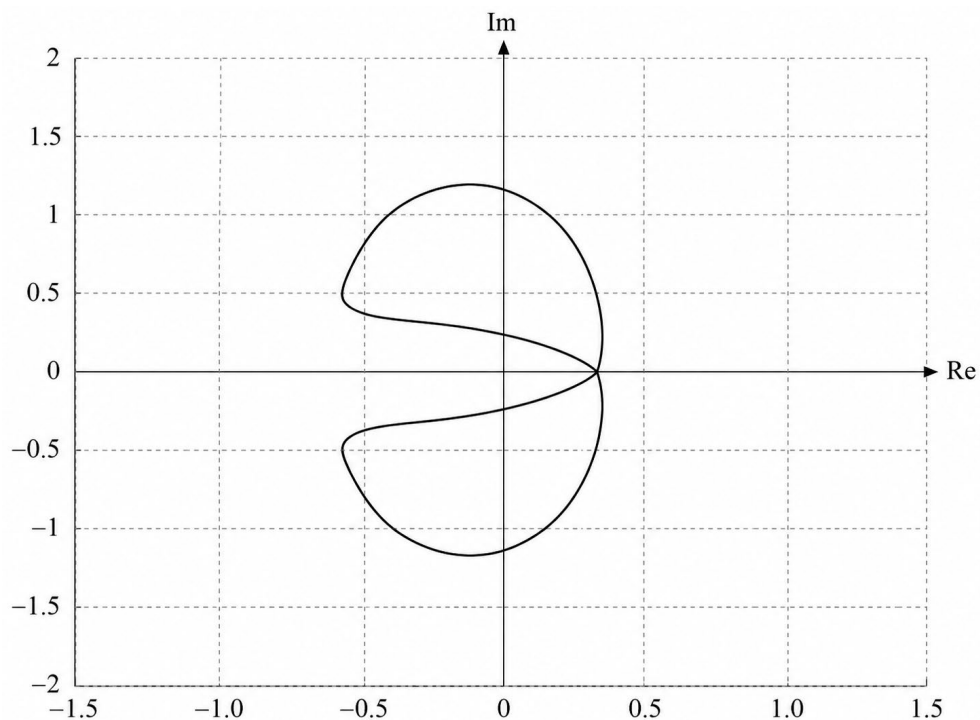


Рисунок 3.6 – Амплітудно-фазова частотна характеристика каскадної системи

Аналіз рис. 3.6 показує, що годограф каскадної системи також не охоплює критичну точку $((-1; j0))$. Це свідчить про стійкість замкненої системи. При цьому каскадна система має більший запас стійкості порівняно з одноконтурною, оскільки внутрішній контур зменшує вплив швидких збурень у паливному каналі.

Якість роботи систем автоматичного керування оцінюється за такими показниками:

- час регулювання t_r ;

- максимальне перерегулювання
- статична похибка e_{pt} ;
- характер згасання перехідного процесу;
- здатність системи компенсувати збурення.

Орієнтовні якісні показники роботи синтезованих систем наведено в табл.

3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння якісних показників одноконтурної та каскадної систем

Показник якості	Одноконтурна САК	Каскадна САК
Час регулювання ($t_{\{r\}}$), с	520	380
Перерегулювання (ρ іgma), %	8	3
Статична похибка ($e_{\{pt\}}$)	0	0
Характер перехідного процесу	Коливальний із помірним згасанням	Аперіодичний або слабкоколивальний
Компенсація збурень	Задовільна	Покращена
Запас стійкості	Достатній	Підвищений

З аналізу табл. 3.2 видно, що обидві системи забезпечують нульову статичну похибку, що пояснюється використанням ПІ-регуляторів. Проте каскадна система має менший час регулювання та менше перерегулювання. Це свідчить про її вищу ефективність при керуванні інерційним тепловим об'єктом.

Для оцінки роботи систем при дії збурення розглянуто зміну парового навантаження котла. У випадку одноконтурної системи компенсація збурення відбувається лише після того, як воно викликає зміну температури перегрітої пари. У каскадній системі частина збурень компенсується внутрішнім контуром регулювання витрати палива, тому відхилення температури є меншим.

Результати дослідження показують, що каскадна система автоматичного керування є доцільнішою для регулювання температури перегрітої пари котельного агрегату. Вона забезпечує кращу швидкодію, менше перерегулювання та вищу стійкість при змінних режимах роботи.

Висновки до розділу

У даному розділі виконано синтез одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування температурою перегрітої пари котельного агрегату.

Для одноконтурної системи вибрано ПІ-регулятор температури, який забезпечує усунення статичної похибки та стабілізацію температури перегрітої пари на заданому рівні. Однак через значну інерційність і запізнення об'єкта така система має обмежену швидкодію.

Для каскадної системи розроблено структуру з двома контурами регулювання: зовнішнім контуром температури перегрітої пари та внутрішнім контуром витрати палива. Для обох контурів застосовано ПІ-регулятори. Наявність внутрішнього контуру дозволяє швидше компенсувати зміни у паливному каналі та зменшити вплив збурень на основний регульований параметр.

Проведений аналіз стійкості за частотним критерієм показав, що обидві системи є стійкими, оскільки їх амплітудно-фазові частотні характеристики не охоплюють критичну точку $(-1; j0)$. Порівняння якісних показників показало, що каскадна система має менший час регулювання, менше перерегулювання та кращу здатність до компенсації збурень.

Отже, для керування температурою перегрітої пари котельного агрегату доцільно використовувати каскадну систему автоматичного керування, яка забезпечує вищу якість регулювання порівняно з одноконтурною системою.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

4.1 Вибір технічних засобів автоматизації

Розробка проектної складової системи автоматичного керування котельним агрегатом передбачає вибір технічних засобів автоматизації, які забезпечують вимірювання основних технологічних параметрів, формування керуючих дій, реалізацію алгоритмів регулювання, передачу інформації та візуалізацію стану технологічного процесу.

Котельний агрегат є складним теплоенергетичним об'єктом із великою кількістю взаємопов'язаних параметрів. Тому технічні засоби автоматизації повинні забезпечувати високу точність вимірювання, надійність роботи в умовах підвищеної температури, вібрацій, запиленості та можливих коливань навантаження.

У даній роботі для реалізації системи автоматичного керування передбачається використання технічних засобів автоматизації фірм **Emerson** та **Schneider Electric**. Засоби Emerson доцільно застосувати для вимірювання технологічних параметрів і керування регулюючими органами, а обладнання Schneider Electric — для побудови програмно-технічного комплексу керування на базі PLC.

До основних вимог, які висуваються до технічних засобів автоматизації котлоагрегату, належать:

- забезпечення безперервного контролю температури, тиску, витрати, рівня та розрідження;
- можливість передавання уніфікованих сигналів 4–20 мА;
- підтримка цифрових протоколів обміну даними;
- достатня точність вимірювання технологічних параметрів;
- стійкість до промислових перешкод;
- можливість інтеграції з PLC та операторською станцією;
- забезпечення аварійної сигналізації та блокувань;

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

- можливість подальшого розширення системи автоматизації.

Основними вимірюваними параметрами котельного агрегату є температура перегрітої пари, тиск пари, рівень води у барабані, витрата палива, витрата живильної води, розрідження у топці, тиск повітря та температура димових газів. Для кожного параметра необхідно вибрати відповідний первинний вимірювальний перетворювач.

Для вимірювання температури перегрітої пари, температури барабана та температури димових газів доцільно застосувати температурні перетворювачі Emerson Rosemount 3144P (рис. 4.1) у комплекті з термоперетворювачами опору або термопарами. Для високотемпературних ділянок, зокрема пароперегрівача і газового тракту, доцільно використовувати термопари у захисних гільзах.



Рисунок 4.1 - Температурний перетворювач Emerson Rosemount 3144P

Для вимірювання тиску перегрітої пари, тиску повітря та перепаду тиску на звужувальних пристроях доцільно застосувати перетворювачі тиску Emerson Rosemount 3051 (рис. 4.2).

Ці прилади можуть використовуватися для вимірювання надлишкового, абсолютного та диференціального тиску, що дозволяє застосовувати їх у різних контурах контролю котельного агрегату.



Рисунок 4.2 - Перетворювач тиску Emerson Rosemount 3051

Для вимірювання рівня води у барабані котла може бути використано диференціальний перетворювач тиску Emerson Rosemount 3051 або рівнемір Rosemount 3051SAL. Вимірювання рівня у барабані є особливо відповідальним, оскільки від нього залежить безпека циркуляції води в еcranних трубах та запобігання потраплянню води у пароперегрівач.

Для вимірювання витрати пари та газоподібних середовищ доцільно використовувати витратоміри Emerson Rosemount 8800D (рис. 4.3) або диференціальні перетворювачі тиску Rosemount 3051 у комплекті зі звужувальними пристроями. Для витрати живильної води також може бути застосований диференціальний метод вимірювання з передаванням сигналу на аналоговий вхід PLC.



Рисунок 4.3 - Витратомір Emerson Rosemount 8800D

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Для керування подачею палива, живильної води та повітря використовуються виконавчі пристрої. Як регулюючі органи можуть застосовуватися клапани Emerson Fisher із цифровими позиціонерами FIELDVUE DVC6200 (рис. 4.5). Позиціонер забезпечує точне позиціонування регулюючого клапана, діагностику його стану та можливість роботи з уніфікованим сигналом керування.



Рисунок 4.5 - Клапан Emerson Fisher із цифровим позиціонером FIELDVUE DVC6200

Основним пристроєм обробки інформації та реалізації алгоритмів керування приймається програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M340. Даний контролер доцільно використовувати для середніх і складних систем автоматизації, до яких належить система керування котельним агрегатом. Він забезпечує роботу з аналоговими та дискретними сигналами, підтримує промислові комунікації та дозволяє реалізувати алгоритми ПІ-регулювання для одноконтурної та каскадної систем.

У складі PLC передбачається використання таких основних модулів:

- центральний процесорний модуль Modicon M340;
- модулі аналогових входів для сигналів 4–20 mA від датчиків температури, тиску, витрати та рівня;
- модулі аналогових виходів для керування позиціонерами регулюючих клапанів;

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- модулі дискретних входів для аварійних сигналів, кінцевих вимикачів і сигналів стану обладнання;
- модулі дискретних виходів для керування пусковою апаратурою, сигналізацією та блокуваннями;
- комунікаційні модулі Ethernet/Modbus TCP для зв'язку з операторською станцією та НМІ-панеллю.

Для локального контролю та керування технологічним процесом передбачається застосування операторської панелі Schneider Electric Harmony або Magelis. На панелі відображаються основні параметри котельного агрегату, стани контурів регулювання, аварійні повідомлення та режими роботи системи.

Для диспетчерського контролю може використовуватись промисловий комп'ютер або операторська станція з програмним забезпеченням SCADA. На цій станції реалізується архівування технологічних параметрів, відображення трендів, формування аварійних повідомлень та ведення журналу подій.

Програмування PLC виконується у середовищі Schneider Electric EcoStruxure Control Expert. У цьому середовищі можуть бути реалізовані алгоритми ПІ-регулювання, логічні блокування, аварійна сигналізація, обробка аналогових сигналів та передавання даних на операторську станцію [2,3].

Зв'язок між рівнями системи автоматизації передбачається за допомогою промислових комунікаційних інтерфейсів. Первинні перетворювачі Emerson передають сигнали до PLC переважно у вигляді уніфікованих аналогових сигналів 4–20 mA. Для діагностики інтелектуальних приладів може використовуватися HART-комунікація. Обмін даними між PLC, НМІ-панеллю та операторською станцією виконується через Ethernet або Modbus TCP.

Перелік основних технічних засобів автоматизації наведено у табл. 4.1.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1 – Вибір технічних засобів автоматизації котельного агрегату

Контрольований або регульований параметр	Технічний засіб автоматизації	Фірма-виробник	Призначення
Температура перегрітої пари	Rosemount 3144P з термопарою	Emerson	Вимірювання температури пари після пароперегрівача
Температура барабана котла	Rosemount 3144P з термоперетворювачем	Emerson	Контроль температурного стану барабана
Температура димових газів	Rosemount 3144P з термопарою	Emerson	Контроль теплового режиму газового тракту
Тиск перегрітої пари	Rosemount 3051	Emerson	Вимірювання тиску пари
Тиск повітря	Rosemount 3051	Emerson	Контроль тиску повітря перед пальниками
Розрідження у топці	Rosemount 3051 Differential Pressure	Emerson	Вимірювання розрідження у топковій камері
Рівень води у барабані	Rosemount 3051SAL або Rosemount 3051 DP	Emerson	Контроль і регулювання рівня води
Витрата пари	Rosemount 8800D або Rosemount 3051 DP	Emerson	Вимірювання витрати пари
Витрата живильної води	Rosemount 3051 DP	Emerson	Вимірювання витрати води перед економайзером
Витрата палива	Rosemount 3051 DP або Rosemount 8800D	Emerson	Формування сигналу для внутрішнього контуру каскадної САК
Регулювання подачі палива	Регулюючий клапан Fisher з FIELDVUE DVC6200	Emerson	Зміна витрати палива за сигналом PLC
Регулювання подачі живильної води	Регулюючий клапан Fisher з позиціонером	Emerson	Підтримання рівня у барабані
Регулювання повітря	Заслінка або клапан з електроприводом	Emerson / Schneider Electric	Керування подачею повітря до топки
Центральний контролер	Modicon M340	Schneider Electric	Реалізація алгоритмів контролю та керування
Модулі введення-виведення	X80 I/O для Modicon M340	Schneider Electric	Підключення аналогових і дискретних сигналів

Операторська панель	Harmony / Magelis HMI	Schneider Electric	Локальна візуалізація і керування
Програмне забезпечення	EcoStruxure Control Expert	Schneider Electric	Програмування PLC та налагодження системи
Операторська станція	Промисловий ПК з SCADA	Schneider Electric	Диспетчерський контроль, архівування, тренди
Комунікаційна мережа	Ethernet, Modbus TCP, HART	Schneider Electric / Emerson	Передавання даних між рівнями системи

Вибрані технічні засоби забезпечують можливість побудови як одноконтурної, так і каскадної системи автоматичного керування температурою перегрітої пари. У разі одноконтурної системи PLC формує керуючу дію безпосередньо за відхиленням температури перегрітої пари. У разі каскадної системи PLC реалізує зовнішній контур регулювання температури та внутрішній контур регулювання витрати палива.

4.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації котельного агрегату розробляється на основі аналізу технологічної схеми, наведеної у підрозділі 1.3. Котельний агрегат ТП-100 включає топкову камеру, барабан, екранні поверхні нагрівання, первинний і вторинний пароперегрівачі, водяний економайзер, повітропідігрівачі, систему подачі палива, систему подачі повітря та тракт відведення димових газів.

Згідно з технологічною схемою, живильна вода подається до водяного економайзера, де попередньо нагрівається теплотою димових газів. Після цього вона надходить у барабан котла. Із барабана вода через опускні труби подається до екранних труб топкової камери, де внаслідок теплообміну утворюється пароводяна суміш. У барабані відбувається сепарація пари та води, після чого насичена пара надходить до пароперегрівачів і перегрівається до заданої температури.

					БР.АКПЗ-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Паливо подається до пальників топкової камери. Для забезпечення процесу горіння у топку подається повітря, яке попередньо підігрівається у повітропідігрівачах. Продукти згорання проходять через поверхні нагрівання, віддають теплоту воді, парі та повітрю, після чого відводяться через газовий тракт.

Функціональна схема автоматизації повинна забезпечувати контроль і регулювання основних технологічних параметрів на всіх ділянках котлоагрегату.

Основним контуром автоматичного керування у даній роботі є контур регулювання температури перегрітої пари. Для його реалізації на виході пароперегрівача встановлюється датчик температури ТТ-101. Сигнал від датчика надходить на аналоговий вхід PLC Modicon M340, де порівнюється із заданим значенням температури. На основі відхилення температури регулятор формує керуючу дію.

У разі реалізації одноконтурної системи сигнал керування з PLC надходить безпосередньо на позиціонер регулюючого клапана або виконавчий механізм подачі палива. Зміна витрати палива призводить до зміни тепловиділення у топці, що впливає на температуру перегрітої пари.

У разі реалізації каскадної системи зовнішній регулятор температури формує завдання для внутрішнього регулятора витрати палива. Для цього у паливному каналі встановлюється витратомір FT-102. Сигнал від нього надходить до PLC, де формується внутрішній контур регулювання. Вихідний сигнал внутрішнього регулятора подається на позиціонер Fisher FIELDVUE DVC6200, який керує положенням регулюючого клапана подачі палива.

Таким чином, каскадна система має дві регульовані величини: температуру перегрітої пари та витрату палива. Така структура дозволяє швидше компенсувати збурення у паливному каналі, оскільки зміна витрати палива фіксується раніше, ніж відбудеться суттєве відхилення температури пари.

Контур регулювання рівня води у барабані реалізується за допомогою датчика рівня LT-103. Сигнал рівня подається на PLC, де порівнюється із заданим значенням. У разі відхилення рівня регулятор формує керуючий сигнал на клапан

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подачі живильної води. Для підвищення якості регулювання рівня доцільно також враховувати витрату пари та витрату живильної води.

Контроль тиску перегрітої пари здійснюється за допомогою перетворювача РТ-104. Цей параметр використовується для контролю навантаження котла, формування аварійної сигналізації та захисту обладнання від перевищення допустимого тиску.

Розрідження у топці контролюється датчиком РДТ-105. Підтримання необхідного розрідження забезпечує нормальне відведення продуктів згоряння та запобігає вибиванню димових газів у приміщення котельні. Сигнал від датчика розрідження надходить до PLC, який формує керуючу дію на димосос або направляючий апарат димососа.

Тиск повітря перед пальниками контролюється перетворювачем РТ-106. Цей параметр використовується для підтримання необхідного співвідношення “паливо — повітря”. У разі недостатньої подачі повітря можливе неповне згоряння палива, а за надлишкової подачі повітря збільшуються теплові втрати з димовими газами.

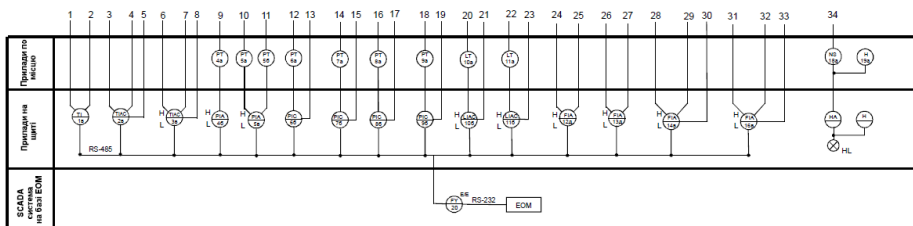
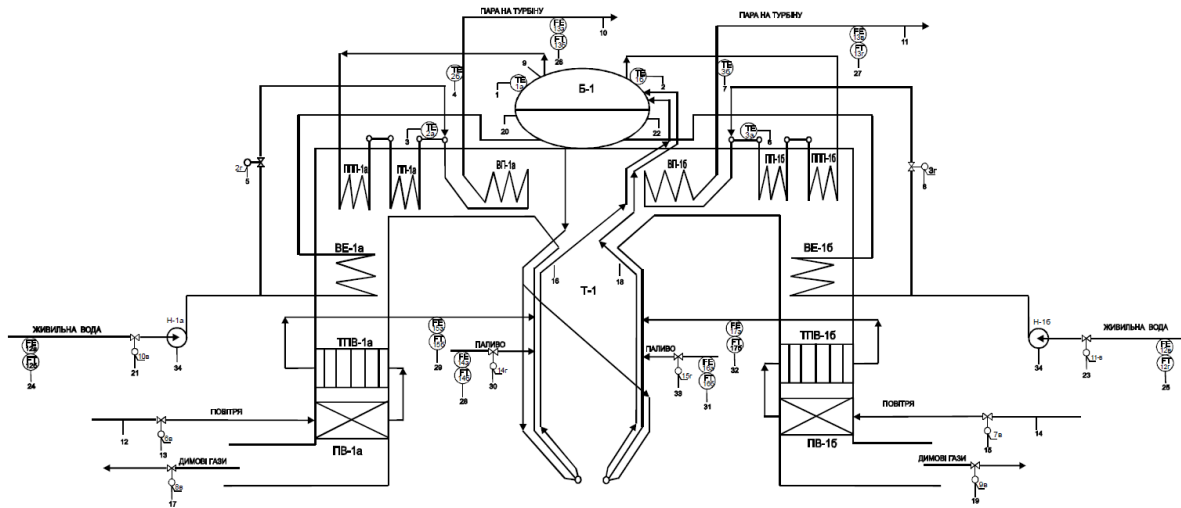
Витрата живильної води контролюється витратоміром FT-107. Цей сигнал використовується для контролю матеріального балансу котла та може бути застосований у системі регулювання рівня води в барабані.

Температура димових газів після основних поверхонь нагрівання контролюється датчиком ТТ-108. Цей параметр характеризує ефективність теплообміну в котельному агрегаті. Підвищення температури димових газів може свідчити про погіршення теплопередачі, забруднення поверхонь нагрівання або порушення режиму горіння.

Для забезпечення безпечної роботи котельного агрегату на функціональній схемі автоматизації також передбачається контроль наявності факела у топці. У разі згасання факела система повинна сформувати аварійний сигнал і виконати блокування подачі палива.

Функціональна схема автоматизації котельного агрегату наведена на рис. 4.6 [4].

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51



ПОЗИЦІЯ	НАЗВА	К-СТЬ	ПРИМІТКИ
Н-1	Відцентровий насос	2	Ø=40 мм/шт
Б-1	Барабан котла	1	Н=1,8 м V=3 м³
ВЕ-1	Водний економайзер	1	T=215 °C
ПП-1	Проміжний пароперегрівач	2	T=400 °C
ПТ-1	Первинний пароперегрівач	2	T=480 °C
ВП-1	Вторинний пароперегрівач	2	T=550 °C
ТПВ-1	Трубчатий повітропідігрівач	2	T=100 °C
ПВ-1	Повітропідігрівач	2	T=60 °C
Т-1	Топка котла	1	V=3770 м³

Рисунок 4.6 – Функціональна схема автоматизації котельного агрегату

Умовні позначення контурів автоматизації наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні контури функціональної схеми автоматизації

Контрольований або регульований параметр	Первинний перетворювач	Виконавчий пристрій	Призначення контуру
Температура перегрітої пари	Rosemount 3144P	Клапан або механізм подачі палива	Основне регулювання температури
Витрата палива	Rosemount 3051 DP або Rosemount 8800D	Fisher + FIELDVUE DVC6200	Внутрішній контур каскадної САК
Рівень води у барабані	Rosemount 3051SAL або 3051 DP	Клапан живильної води	Підтримання рівня у барабані
Тиск перегрітої пари	Rosemount 3051	—	Контроль тиску і сигналізація

Розрідження у топці	Rosemount 3051 DP	Димосос або напрямний апарат	Підтримання розрідження
Тиск повітря	Rosemount 3051	Заслінка або вентилятор	Контроль подачі повітря
Витрата живильної води	Rosemount 3051 DP	Клапан живильної води	Контроль матеріального балансу
Температура димових газів	Rosemount 3144P	—	Контроль ефективності теплообміну
Наявність факела	Датчик полум'я	Блокування подачі палива	Захист котла при згасанні факела

Сигнали від первинних перетворювачів надходять на аналогові та дискретні входи PLC. У контролері виконується масштабування сигналів, фільтрація, перевірка на допустимість, реалізація алгоритмів регулювання та формування команд на виконавчі пристрої.

Для аналогових вимірювальних каналів приймається уніфікований сигнал:

$$I = 4 \dots 20$$

Значення технологічного параметра визначається за формулою масштабування:

$$X = X_{min} + \frac{I - 4}{16} (X_{max} - X_{min}), \quad (4.1)$$

де

X — поточне значення технологічного параметра;

X_{min} , X_{max} — нижня та верхня межі діапазону вимірювання;

I — струмовий сигнал від вимірювального перетворювача.

Для формування керуючої дії у PLC реалізується ПІ-закон регулювання:

$$u(t) = K_r \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right], \quad (4.2)$$

де

$u(t)$ — керуюча дія;

K_r — коефіцієнт підсилення регулятора;

T_i — час інтегрування;

$e(t)$ — похибка регулювання.

Для каскадної системи зовнішній регулятор температури формує завдання для внутрішнього регулятора витрати палива:

$$F_{f,zad} = f(t_{zad} - t_{pp}), \quad (4.3)$$

де

$F_{f,zad}$ — задане значення витрати палива;

t_{zad} — задана температура перегрітої пари;

t_{pp} — фактична температура перегрітої пари.

Внутрішній регулятор формує керуючий сигнал на регулюючий клапан подачі палива:

$$u_f = f(F_{f,zad} - F_f), \quad (4.4)$$

де

u_f — керуючий сигнал на виконавчий механізм;

F_f — фактична витрата палива.

Для забезпечення безпечної роботи котельного агрегату у PLC реалізуються аварійні блокування. До основних аварійних умов належать:

- зниження рівня води у барабані нижче допустимого значення;
- підвищення рівня води у барабані вище допустимого значення;
- перевищення температури перегрітої пари;
- перевищення тиску перегрітої пари;
- зникнення факела у топці;
- недостатній тиск повітря перед пальниками;
- порушення розрідження у топці;
- відмова датчика або обрив вимірювального кола.

У разі виникнення аварійної ситуації система автоматизації повинна сформувати звукову та світлову сигналізацію, вивести повідомлення на операторську панель і, за необхідності, виконати захисне відключення подачі палива.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблена функціональна схема автоматизації забезпечує комплексний контроль технологічного процесу котельного агрегату та створює основу для реалізації одноконтурної й каскадної систем автоматичного керування.

Висновки до розділу

У даному розділі виконано вибір технічних засобів автоматизації для системи автоматичного керування котельним агрегатом. Для вимірювання технологічних параметрів і керування виконавчими органами запропоновано використати технічні засоби фірми Emerson, зокрема перетворювачі тиску, температури, витрати та цифрові позиціонери регулюючих клапанів.

Як основний контролер системи автоматизації прийнято PLC Schneider Electric Modicon M340. Для локального керування та візуалізації процесу передбачено використання операторської панелі Schneider Electric Harmony або Magelis, а для програмування — середовища EcoStructure Control Expert.

Розроблено структуру функціональної схеми автоматизації котельного агрегату. Вона включає контури регулювання температури перегрітої пари, витрати палива, рівня води у барабані, розрідження у топці, а також контури контролю тиску пари, тиску повітря, витрати живильної води та температури димових газів.

Запропонована система автоматизації дозволяє реалізувати як одноконтурну, так і каскадну систему автоматичного керування. Найбільш ефективною для регулювання температури перегрітої пари є каскадна структура, у якій зовнішній контур стабілізує температуру, а внутрішній контур забезпечує швидке регулювання витрати палива.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі виконано синтез автоматичної системи керування котельним агрегатом. Об'єктом дослідження обрано котельний агрегат ТП-100, призначений для отримання перегрітої пари високого тиску. У процесі виконання роботи розглянуто технологічні особливості роботи котлоагрегату, визначено основні параметри контролю та регулювання, побудовано математичні моделі об'єкта керування, виконано синтез одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування, а також розроблено проектну складову системи автоматизації.

Установлено, що найважливішим параметром для регулювання є температура перегрітої пари, оскільки її відхилення від заданого значення може призвести до зниження економічності роботи енергетичної установки, погіршення якості пари та підвищення теплового навантаження на обладнання. Тому саме цей параметр прийнято як основний регульований параметр системи автоматичного керування.

Отримані математичні моделі дозволили сформулювати структурні схеми одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування. Одноконтурна система розглядалася як базовий варіант, а каскадна — як удосконалена структура, що містить зовнішній контур регулювання температури перегрітої пари та внутрішній контур регулювання витрати палива.

Проведений аналіз роботи розроблених систем показав, що обидві системи є стійкими та забезпечують стабілізацію температури перегрітої пари. Водночас каскадна система має кращі динамічні властивості порівняно з одноконтурною. Вона забезпечує менший час регулювання, менше перерегулювання та кращу компенсацію збурень у паливному каналі.

За результатами порівняння встановлено, що використання каскадної системи автоматичного керування є більш доцільним для котельного агрегату, оскільки вона дозволяє підвищити якість регулювання температури перегрітої пари та забезпечити стабільніший режим роботи котла при зміні навантаження.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як основний пристрій керування обрано програмований логічний контролер Schneider Electric Modicon M340. Для візуалізації та керування технологічним процесом передбачено використання операторської панелі Schneider Electric Harmony або Magelis, а для програмування та налагодження — програмного забезпечення EcoStruxure Control Expert.

Розроблено функціональну схему автоматизації котельного агрегату, яка включає контури регулювання температури перегрітої пари, витрати палива, рівня води у барабані, розрідження у топці, а також контури контролю тиску пари, тиску повітря, витрати живильної води та температури димових газів. Передбачено також аварійну сигналізацію та блокування для забезпечення безпечної роботи обладнання.

Отже, у результаті виконання бакалаврської роботи було розроблено систему автоматичного керування котельним агрегатом, яка забезпечує стабільне підтримання температури перегрітої пари, підвищує якість регулювання та зменшує вплив збурень на технологічний процес [5]. Найбільш ефективною для даного об'єкта є каскадна система автоматичного керування, яка за рахунок внутрішнього контуру регулювання витрати палива забезпечує кращу швидкодію та стійкість роботи котлоагрегату.

Результати роботи можуть бути використані для розроблення, модернізації та впровадження систем автоматизації котельних агрегатів на енергетичних і промислових об'єктах.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Ладанюк А. П., Кишенько В. Д., Луцька Н. М. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами: навчальний посібник. Київ: НУХТ, 2014.
2. Пупена О. М., Ельперін І. В. Програмовані логічні контролери та їх застосування в автоматизованих системах керування: навчальний посібник. Київ: НУХТ, 2013.
3. ДСТУ EN 61131-3:2022. Програмовані контролери. Частина 3. Мови програмування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022.
4. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Автоматизація технологічних процесів. Зображення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009.
5. Методичні вказівки до виконання бакалаврських робіт для здобувачів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2024.

					БР.АКПз-12.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58