

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ

Група АКП-22-1

Максим Остап'юк

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

Остап'юк Максим Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.51

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ ТЕПЛОНОСІЯ В ТРУБЧАТІЙ ПЕЧІ

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент

(посада)

О.В. Кучмистенко

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

Л.І. Фешанич

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1

(шифр групи)

М.В. Остап'юк

(підпис)

(дата)

(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)

(повне найменування закладу вищої освіти)

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

(шифр і назва)

« » 2026 року

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

БР.АКП-76.00.00.000 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 технологічного процесу нагрівання теплоносія як об'єкта автоматичного контролю і керування	10.05.2026	
2.	Аналіз літературних джерел по сучасних системах автоматизації трубчастих печей	15.05.2026	
3.	Математичне моделювання і ідентифікація об'єкта керування	20.05.2026	
4.	Синтез та аналіз системи автоматичного керування	30.05.2026	
5.	Розробка проектної складової системи керування	07.06.2026	

Студент _____
(підпис)

М.В. Остап'юк _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

І.І. Чигур _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 65 сторінок друкованого тексту, 19 рисунків, 8 таблиць, 9 посилань на джерела.

Тема: «Автоматизація процесу нагрівання теплоносія в трубчатій печі».

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

Мета роботи: розроблення системи автоматизації процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі, яка забезпечує стабільне підтримання заданої температури теплоносія, підвищення енергоефективності та надійності функціонування технологічної установки.

Методи дослідження: методи системного аналізу, методи математичного моделювання, методи теорії автоматичного керування методи комп'ютерного моделювання.

Результати кваліфікаційної роботи: Проведено аналіз технологічного процесу, конструктивних особливостей трубчастої печі та визначено основні параметри, що підлягають контролю та регулюванню.

На основі рівнянь теплового балансу побудовано математичну модель об'єкта керування та визначено передавальні функції основних каналів системи. Виконано синтез одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування температурою теплоносія. Проведено аналіз динамічних характеристик систем, досліджено їх стійкість та якість регулювання. Встановлено, що каскадна система автоматичного керування забезпечує кращі показники швидкодії, точності та стійкості порівняно з одноконтурною системою.

У роботі виконано вибір сучасних технічних засобів автоматизації на базі обладнання компаній Emerson та Schneider Electric. Розроблено функціональну схему автоматизації.

Ключові слова: трубчаста піч, автоматизація, теплоносій, система автоматичного керування, ПІ-регулятор, каскадна система, математична модель, функціональна схема автоматизації, контролер, технологічний процес.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains: 65 pages of printed text, 19 figures, 8 tables, and 9 references.

Topic: “Automation of the Heat Carrier Heating Process in a Tubular Furnace”.

Object of research: the process of heating a heat carrier in a tubular furnace.

Purpose of the work: development of an automation system for the heat carrier heating process in a tubular furnace, which ensures stable maintenance of the заданої temperature of the heat carrier, improvement of energy efficiency, and reliability of technological unit operation.

Research methods: methods of system analysis, mathematical modeling methods, methods of automatic control theory, and computer simulation methods.

Results of the qualification work: An analysis of the technological process and the design features of the tubular furnace was carried out, and the main parameters subject to monitoring and control were determined.

Based on the heat balance equations, a mathematical model of the control object was developed and transfer functions of the main system channels were determined. The synthesis of single-loop and cascade automatic control systems for the heat carrier temperature was performed. The dynamic characteristics of the systems were analyzed, and their stability and control quality were investigated. It was established that the cascade automatic control system provides better response speed, accuracy, and stability compared to the single-loop system.

The work also includes the selection of modern automation hardware based on equipment manufactured by Emerson and Schneider Electric. A functional automation diagram was developed.

Keywords: tubular furnace, automation, heat carrier, automatic control system, PI controller, cascade system, mathematical model, functional automation diagram, controller, technological process.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ ТЕПЛОНОСІЯ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ.....	11
1.1 Призначення установки та суть процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі	
1.2 Характеристика продукції, сировини та реагентів.....	13
1.3 Технічна характеристика технологічного обладнання.....	16
1.4 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання.....	18
Висновки до розділу.....	20
2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ПО СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРУБЧАСТИХ ПЕЧЕЙ.....	22
2.1 Загальна характеристика трубчастих печей як об'єктів автоматизації	22
2.2 Аналіз існуючих підходів до автоматизації трубчастих печей	25
2.3 Сучасні інформаційно-керуючі системи трубчастих печей	24
2.4 Інтелектуальні методи керування трубчастими печами	25
2.5 Аналіз проблем та перспектив розвитку систем автоматизації трубчастих печей	26
Висновки до розділу	27
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	29
3.1 Обґрунтування вибору об'єкта автоматизації.....	29

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація процесу нагрівання теплоносія в трубчатій печі	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Остап'юк М.В.					6	67
Перевір.		Чигур І.І.						
Реценз.		Фешанич Л.І.						
Н. Контр.		Кучмистенко О.В						
Затверд.		Лагойда А.І.				Група АКП-22-1 ІФНТУНГ		

3.2	Визначення характеристик об'єкта автоматизації.....	31
	Висновки до розділу.....	34
4	СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	36
4.1.	Синтез одноконтурної системи автоматичного керування.....	42
4.2	Синтез каскадної системи автоматичного керування.....	45
4.3	Аналіз роботи розроблених систем автоматичного керування.....	48
	Висновки до розділу.....	50
5	РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	51
5.1	Вибір технічних засобів автоматизації.....	51
5.2	Розробка функціональної схеми автоматизації	57
	Висновки до розділу.....	61
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	63
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	65

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості характеризується постійним зростанням вимог до ефективності, надійності та безпечності технологічних процесів. Особливе місце серед виробничих установок займають теплоенергетичні та нафтогазопереробні об'єкти, у яких широко застосовуються трубчасті печі для нагрівання різноманітних теплоносіїв. Від якості керування процесом нагрівання залежить не лише ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів, але й стабільність роботи технологічного обладнання, якість кінцевої продукції та рівень промислової безпеки.

Процес нагрівання теплоносія в трубчастій печі належить до складних теплотехнічних процесів, які характеризуються значною інерційністю, наявністю зовнішніх і внутрішніх збурень, нелінійністю характеристик обладнання та взаємозв'язком між окремими технологічними параметрами. До основних факторів, що впливають на якість функціонування трубчастої печі, належать витрата теплоносія, температура на вході та виході з печі, витрата палива, коефіцієнт надлишку повітря, стан теплообмінних поверхонь та інші параметри. Підтримання необхідного температурного режиму за допомогою традиційних методів керування часто не забезпечує достатньої точності регулювання, особливо в умовах зміни навантаження та характеристик об'єкта.

Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення стабільних параметрів технологічного процесу. Впровадження сучасних систем автоматизації дозволяє підтримувати задану температуру теплоносія з високою точністю, мінімізувати вплив збурень, підвищити надійність роботи обладнання та зменшити ризик виникнення аварійних ситуацій. Крім того, автоматизація процесів нагрівання є одним із важливих напрямів цифрової трансформації промислових підприємств і впровадження концепцій інтелектуального виробництва.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Питання автоматизації теплотехнічних процесів широко висвітлені в наукових дослідженнях вітчизняних та зарубіжних учених. Значна увага приділяється розробленню математичних моделей теплових об'єктів, удосконаленню алгоритмів автоматичного регулювання, використанню програмованих логічних контролерів, мікропроцесорних засобів керування та сучасних SCADA-систем. Аналіз наукових праць свідчить про постійний розвиток методів автоматизації трубчастих печей, однак питання забезпечення високої точності регулювання температури теплоносія в умовах змінних режимів роботи залишаються актуальними та потребують подальшого дослідження. Саме тому розроблення ефективної системи автоматизації процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі є важливим практичним і науково-технічним завданням.

Об'єктом дослідження є процес нагрівання теплоносія в трубчастій печі.

Предметом дослідження є методи та засоби автоматизації процесу нагрівання теплоносія, а також алгоритми автоматичного регулювання температурного режиму трубчастої печі.

Метою бакалаврської роботи є розроблення системи автоматизації процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі, яка забезпечує стабільне підтримання заданої температури теплоносія, підвищення енергоефективності та надійності функціонування технологічної установки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- провести аналіз технологічного процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі;
- дослідити особливості функціонування трубчастої печі як об'єкта автоматизації;
- визначити основні параметри, що підлягають контролю та регулюванню;
- розробити функціональну схему автоматизації технологічного процесу;
- обґрунтувати вибір технічних засобів контролю, регулювання та керування;
- розробити систему автоматичного регулювання температури теплоносія;

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- виконати моделювання роботи системи керування та оцінити показники її якості;
- проаналізувати економічну доцільність впровадження розробленої системи автоматизації.

Для досягнення поставленої мети в роботі використано комплекс **методів дослідження**. Під час аналізу технологічного процесу застосовано методи системного аналізу, що дозволили визначити структуру об'єкта автоматизації та взаємозв'язки між його параметрами. Для дослідження динамічних властивостей трубчастої печі використано методи математичного моделювання, які дали змогу отримати математичний опис об'єкта та дослідити його поведінку в різних режимах роботи. При розробленні системи автоматичного регулювання використано методи теорії автоматичного керування для вибору структури системи та налаштування регулятора. Для оцінювання ефективності функціонування системи застосовано методи комп'ютерного моделювання та аналізу перехідних процесів, що забезпечують перевірку працездатності прийнятих технічних рішень. Використання зазначених методів дозволяє отримати достовірні результати дослідження та сформулювати обґрунтовані висновки щодо ефективності запропонованої системи автоматизації.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання розроблених технічних рішень для модернізації існуючих систем керування трубчастими печами та підвищення ефективності функціонування теплоенергетичних і промислових установок. Реалізація запропонованої системи автоматизації сприятиме підвищенню точності підтримання температурного режиму, зменшенню енерговитрат та покращенню показників надійності й безпеки технологічного процесу.

Структура та обсяг роботи. Бакалаврська робота складається із вступу, п'ятих розділів, загальних висновків, списку літератури. Робота виконана на 65 сторінках друкованого тексту, містить 19 рисунків, та список використаних джерел з 9 найменувань.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ ТЕПЛОНОСІЯ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ

1.1 Призначення установки та суть процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі

Трубчасті печі широко використовуються в нафтогазовій, хімічній та енергетичній промисловості для нагрівання рідких і газоподібних середовищ до заданих технологічних параметрів. Вони забезпечують передачу теплової енергії від продуктів згоряння палива до теплоносія, який циркулює по трубних змійовиках. Ефективність роботи трубчастої печі значною мірою визначає якість протікання подальших технологічних процесів, тому підтримання необхідного температурного режиму є одним із головних завдань системи автоматизації.

У даній роботі розглядається вертикальна циліндрична піч ЦС-1, яка використовується в складі установки осушки природного газу та призначена для нагрівання теплоносія Т-1 від температури 200 °С до температури 250 °С. Нагрітий теплоносій надалі використовується для забезпечення необхідних умов перебігу технологічних процесів осушки природного газу.

Технологічна схема трубчастої печі наведена на рис. 1.1. Основними конструктивними елементами печі є камера радіації, камера конвекції, пальникові пристрої для спалювання палива та система створення тяги, до складу якої входять димова труба і димососи. Узгоджена робота зазначених елементів забезпечує ефективне використання теплоти згоряння палива та підтримання необхідного температурного режиму теплоносія.

Принцип роботи печі полягає в передачі теплоти від продуктів згоряння природного газу до теплоносія, який переміщується трубними змійовиками. Холодний теплоносій із температурою 200 °С спочатку надходить у змійовики конвекційної камери, де нагрівається за рахунок теплоти димових газів, що залишають радіаційну зону. Після цього теплоносій потрапляє до змійовиків камери радіації, де відбувається його основне нагрівання під дією променистого

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теплового потоку від факела та нагрітих поверхонь камери. На виході з печі теплоносії досягає температури 250 °С і направляється до наступних технологічних вузлів установки.

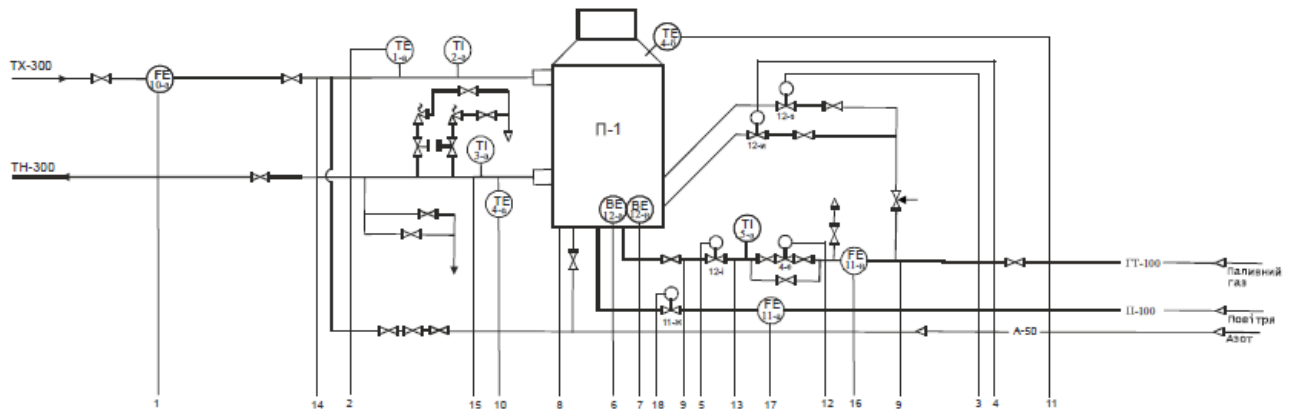


Рисунок 1.1 – Технологічна схема трубчастої печі

Рух теплоносія та продуктів згоряння в печі організований за принципом протитечії. Така схема забезпечує найбільш ефективне використання теплоти палива, оскільки холодний теплоносії контактує з охолодженими продуктами згоряння в конвекційній частині, а найбільш нагрітий теплоносії перебуває в зоні максимальних температур радіаційної камери. Завдяки цьому підвищується коефіцієнт корисної дії установки та зменшуються теплові втрати.

Піч ЦС-1 має такі основні конструктивні характеристики: внутрішній діаметр кожуха становить 5,6 м, робоча довжина радіаційних труб – 10 м, крок розміщення труб – 0,4 м. Зовнішній діаметр труб у радіаційній камері становить 0,219 м, а в конвекційній камері – 0,108 м. Ефективний об'єм паливної камери дорівнює 0,021084 м³. Для відведення продуктів згоряння використовується димова труба висотою 12 м, яка разом із димососами забезпечує необхідну тягу та стабільність процесу горіння.

Теплова потужність печі становить 10 000 000 ккал/год, що забезпечує необхідну інтенсивність нагрівання теплоносія відповідно до вимог технологічного процесу. Коефіцієнт корисної дії печі дорівнює 0,8, тобто близько 80 % теплоти, що виділяється під час спалювання палива, використовується

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ		Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			12

безпосередньо для нагрівання теплоносія.

До основних технологічних параметрів процесу належать температура теплоносія на вході та виході з печі, витрата теплоносія, витрата паливного газу, витрата повітря на горіння, температура димових газів та розрідження в топковому просторі. Підтримання цих параметрів у заданих межах забезпечує стабільну роботу установки, високу енергоефективність і безпечну експлуатацію обладнання.

Таким чином, трубчаста піч ЦС-1 є важливим елементом установки осушки природного газу, а процес нагрівання теплоносія в ній являє собою складний теплотехнічний об'єкт керування, для якого необхідне застосування сучасних засобів автоматизації та регулювання.

1.2 Характеристика продукції, сировини та реагентів

Технологічний процес, у складі якого використовується трубчаста піч ЦС-1, належить до установки осушки природного газу. Основною метою установки є зниження вмісту вологи в природному газі до значень, що забезпечують безпечне транспортування та подальше використання газу без утворення гідратів і корозійних пошкоджень обладнання. Для забезпечення необхідного температурного режиму процесу використовується теплоносій, який нагрівається в трубчастій печі.

Основною продукцією установки є осушений природний газ (табл. 1.1). Після проходження процесу осушки газ повинен відповідати вимогам нормативних документів щодо вмісту вологи, механічних домішок та інших контрольованих показників. Зниження вологовмісту забезпечує: – запобігання утворенню газових гідратів у трубопроводах і технологічному обладнанні; – зменшення корозійного впливу на металеві поверхні; – підвищення надійності роботи компресорного та транспортного обладнання; – забезпечення стабільних фізико-хімічних властивостей газу під час транспортування та зберігання. Температурний режим теплоносія, який формується в трубчастій печі,

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпосередньо впливає на ефективність роботи вузлів осушки та на якість кінцевого продукту.

Таблиця 1.1 – Характеристика продукції, сировини та реагентів

Найменування	Призначення	Основні характеристики	Робочі параметри
Осушений природний газ	Кінцева продукція установки	Знижений вміст вологи, відсутність умов для утворення гідратів, відповідність вимогам транспортування	Тиск і температура визначаються технологічним режимом установки
Природний газ	Основна сировина	Метан (основний компонент), етан, пропан, бутан, азот, CO ₂ , водяна пара	Надходить на установку для осушки
Паливний газ	Паливо для трубчастої печі	Висока теплота згоряння, стабільний склад, низький вміст механічних домішок	Використовується для отримання теплової енергії в печі
Теплоносій Т-1	Передача теплової енергії в технологічному процесі	Висока теплоємність, термічна стабільність, низька корозійна активність	Температура на вході 200 °С, температура на виході 250 °С
Повітря для горіння	Забезпечення процесу спалювання палива	Містить кисень, необхідний для повного згоряння паливного газу	Подається до пальникових пристроїв печі
Триетиленгліколь (ТЕГ)	Осушення природного газу	Висока гігроскопічність, можливість регенерації, термічна стійкість	Використовується в абсорбційній системі осушки
Інгібітори корозії (за необхідності)	Захист обладнання від корозії	Знижують швидкість корозійних процесів	Дозуються відповідно до технологічного регламенту
Антипінні реагенти (за необхідності)	Запобігання піноутворенню	Підвищують стабільність роботи обладнання	Використовуються в невеликих концентраціях

Наведені в табл. 1.1 продукти, сировина та реагенти забезпечують нормальне функціонування установки осушки природного газу. Особливе значення для роботи трубчастої печі має підтримання заданих параметрів теплоносія Т-1 та стабільної подачі паливного газу, оскільки саме вони визначають ефективність процесу нагрівання та якість кінцевої продукції.

Основною сировиною для установки є природний газ. Типовий склад природного газу включає метан як основний компонент, а також етан, пропан, бутани, азот, діоксид вуглецю та слідові кількості інших компонентів. У газі також присутня водяна пара, яку необхідно видалити в процесі осушки. До основних характеристик природного газу, що мають значення для технологічного процесу, належать: – тиск і температура на вході в установку; – вологовміст; – компонентний склад; – теплота згоряння; – наявність домішок, що можуть викликати корозію або утворення відкладень. Для роботи трубчастої печі як паливо зазвичай використовується паливний газ, який надходить до пальникових пристроїв. Його стабільний склад і теплота згоряння є важливими факторами забезпечення необхідної теплової потужності печі.

У трубчастій печі нагрівається теплоносій Т-1. Він використовується для передачі теплової енергії до технологічного обладнання установки осушки природного газу. Від теплоносія вимагаються: – висока теплоємність; – термічна стабільність у робочому діапазоні температур; – низька корозійна активність; – безпечність експлуатації; – сумісність із матеріалами обладнання. У розглянутому процесі теплоносій надходить до печі з температурою 200 °С та нагрівається до 250 °С. Стабільність цих параметрів є одним із основних критеріїв ефективності системи автоматизації.

Для процесу осушки природного газу можуть застосовуватися спеціальні реагенти-осушувачі. Найбільш поширеними є гліколі, зокрема триетиленгліколь (ТЕГ), який характеризується: – високою гігроскопічністю; – здатністю поглинати водяну пару з природного газу; – термічною стійкістю; – можливістю багаторазової регенерації. У процесі експлуатації гліколь циркулює між абсорбером і вузлом регенерації, де відновлюються його осушувальні властивості.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нагрітий у печі теплоносії може використовуватися для забезпечення необхідного теплового режиму регенерації гліколю або інших технологічних операцій установки. Крім основного реагенту, у системі можуть застосовуватися допоміжні хімічні речовини, зокрема інгібітори корозії, антипінні добавки та реагенти для підготовки води, якщо вони передбачені технологічною схемою підприємства. Усі сировинні матеріали, теплоносії та реагенти повинні відповідати вимогам чинних стандартів і технічних умов. Особливу увагу приділяють: – стабільності фізико-хімічних властивостей; – відсутності механічних домішок; – корозійній безпечності; – пожежо- та вибухобезпечності; – екологічній безпечності поводження та утилізації. Дотримання цих вимог є необхідною умовою надійної роботи трубчастої печі, ефективної осушки природного газу та безпечної експлуатації технологічної установки загалом.

1.3 Технічна характеристика технологічного обладнання

Основним технологічним обладнанням, що розглядається в даній роботі, є трубчаста піч ЦС-1, призначена для нагрівання теплоносія Т-1 в установці осушки природного газу. Піч належить до вертикальних циліндричних печей безперервної дії та забезпечує нагрівання теплоносія від 200 °С до 250 °С за рахунок спалювання паливного газу.

Конструкція печі включає камеру радіації, камеру конвекції, пальникові пристрої, систему подачі паливного газу та повітря, систему відведення продуктів згоряння, а також димову трубу і димососи для створення необхідного розрідження в топковому просторі. Передача теплоти до теплоносія здійснюється через трубні змійовики, розташовані в конвекційній та радіаційній камерах.

Камера радіації є основною зоною теплопередачі, де теплоносії нагрівається за рахунок теплового випромінювання факела та нагрітих поверхонь топки. Камера конвекції призначена для утилізації теплоти димових газів та попереднього підігрівання теплоносія перед його надходженням у радіаційну секцію. Така конструкція дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії печі та

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

знизити питомі витрати палива.

Основні технічні характеристики трубчастої печі ЦС-1 наведені в табл.1.2.

Таблиця 1.2 – Технічна характеристика технологічного обладнання

Найменування обладнання	Призначення	Основні технічні характеристики
Трубчаста піч ЦС-1	Нагрівання теплоносія Т-1	Тип – вертикальна циліндрична; теплова потужність – 10 000 000 ккал/год; ККД – 0,8; температура теплоносія на вході – 200 °С; температура теплоносія на виході – 250 °С
Камера радіації	Основне нагрівання теплоносія за рахунок теплового випромінювання	Робоча довжина радіаційних труб – 10,0 м; зовнішній діаметр труб – 0,219 м
Камера конвекції	Попереднє нагрівання теплоносія теплотою димових газів	Зовнішній діаметр труб – 0,108 м; забезпечує утилізацію теплоти продуктів згоряння
Кожух печі	Розміщення внутрішніх елементів та ізоляція процесу горіння	Внутрішній діаметр – 5,6 м
Пальникові пристрої	Спалювання паливного газу та утворення теплової енергії	Працюють на паливному газі; забезпечують стабільне горіння
Паливна камера	Створення умов для ефективного згоряння палива	Ефективний об'єм – 0,021084 м³
Змійовики печі	Передача теплоти теплоносію	Крок розміщення труб – 0,4 м
Димосос	Відведення продуктів згоряння та створення тяги	Забезпечує необхідне розрідження в топковому просторі
Димова труба	Відведення димових газів в атмосферу	Висота – 12,0 м
Датчики температури	Контроль температури теплоносія та димових газів	Встановлюються на вході та виході печі, а також у газоході
Витратоміри газу та повітря	Контроль витрати палива та повітря	Забезпечують підтримання оптимального співвідношення «паливо–повітря»
Датчики тиску та розрідження	Контроль безпечної роботи печі	Контроль тиску та розрідження в топковому просторі і димовому тракті

Для забезпечення нормальної роботи трубчастої печі використовуються допоміжні технологічні системи, до яких належать система подачі паливного газу,

система подачі повітря на горіння, система контролю та регулювання температури, система контролю тиску і розрідження, а також система аварійного захисту.

Аналіз технічних характеристик показує, що піч ЦС-1 є високопродуктивним теплотехнічним агрегатом із значною тепловою інерційністю. Це обумовлює необхідність застосування сучасних засобів автоматичного контролю та регулювання для підтримання стабільного температурного режиму, забезпечення енергоефективності та безпечної експлуатації обладнання.

1.4 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання

Ефективність роботи трубчастої печі ЦС-1 значною мірою залежить від правильного вибору контрольованих і регульованих параметрів технологічного процесу. Основним завданням автоматизації є забезпечення стабільного нагрівання теплоносія до заданої температури при мінімальних витратах палива та дотриманні вимог безпечної експлуатації обладнання.

Вибір параметрів контролю та регулювання здійснюється на основі аналізу технологічного процесу, конструктивних особливостей печі та вимог до якості нагрівання теплоносія. Контролю підлягають параметри, які характеризують тепловий стан печі, ефективність процесу горіння та безпечність роботи обладнання.

Основним регульованим параметром є температура теплоносія на виході з печі. Саме цей показник визначає ефективність роботи установки осушки природного газу та якість подальших технологічних процесів. Відхилення температури від заданого значення може призвести до погіршення технологічного режиму, зниження енергоефективності та збільшення експлуатаційних витрат.

Керуючим впливом у системі автоматичного регулювання температури є витрата паливного газу, яка змінюється регулюючим клапаном на лінії подачі

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

палива до пальників. Зміна витрати газу безпосередньо впливає на теплову потужність печі та температуру нагрівання теплоносія.

Крім основного контуру регулювання температури, для забезпечення надійної та економічної роботи печі необхідно контролювати ряд допоміжних технологічних параметрів. До них належать витрата паливного газу, витрата повітря для горіння, температура димових газів, розрідження в топковому просторі та тиск у паливній магістралі.

Таблиця 1.3 – Параметри контролю та регулювання трубчастої печі ЦС-1

Параметр	Призначення контролю	Вид автоматизації
Температура теплоносія на виході з печі	Забезпечення необхідного температурного режиму	Контроль, регулювання, сигналізація
Температура теплоносія на вході в піч	Контроль теплового навантаження печі	Контроль
Витрата паливного газу	Контроль споживання палива та теплової потужності	Контроль, регулювання
Витрата повітря на горіння	Забезпечення оптимального процесу горіння	Контроль, регулювання
Температура димових газів	Оцінка ефективності тепловикористання	Контроль, сигналізація
Розрідження в топковому просторі	Забезпечення стійкого горіння та безпеки	Контроль, регулювання, сигналізація
Тиск паливного газу перед пальниками	Контроль стабільності подачі палива	Контроль, сигналізація
Наявність полум'я в пальниках	Забезпечення безпечної роботи печі	Контроль, захист
Тиск повітря на пальниках	Контроль умов горіння	Контроль, сигналізація

Температура теплоносія на виході з печі є головним технологічним параметром і використовується як регульована координата системи автоматичного керування. Для підтримання заданої температури

використовується одноконтурна система автоматичного регулювання з ПІ-регулятором, що впливає на витрату паливного газу.

Контроль температури димових газів дозволяє оцінювати ефективність використання теплоти палива. Надмірне підвищення температури димових газів свідчить про збільшення теплових втрат через димову трубу та зниження коефіцієнта корисної дії печі.

Важливим параметром є розрідження в топковому просторі. Підтримання невеликого від'ємного тиску запобігає прориву полум'я та продуктів згоряння через нещільності корпусу печі. Регулювання розрідження здійснюється шляхом зміни продуктивності димососа або положення направляючого апарата.

Витрата повітря для горіння повинна відповідати витраті паливного газу. Недостатня кількість повітря призводить до неповного згоряння палива та зниження ефективності роботи печі, а надлишок повітря збільшує теплові втрати з димовими газами. Тому доцільним є застосування системи автоматичного підтримання співвідношення «паливо–повітря».

Для забезпечення безпечної експлуатації печі передбачаються технологічні блокування та аварійний захист. Аварійне вимкнення подачі палива повинно здійснюватися при згасанні полум'я пальників, зниженні тиску паливного газу нижче допустимого значення, порушенні тяги або перевищенні граничної температури теплоносія.

Таким чином, обрані параметри контролю та регулювання забезпечують підтримання необхідного температурного режиму теплоносія, підвищення енергоефективності процесу нагрівання, надійну роботу обладнання та безпечну експлуатацію трубчастої печі ЦС-1.

Висновки до розділу

У розділі проведено аналіз технологічного процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1 та визначено основні параметри, що підлягають контролю, регулюванню і сигналізації. Встановлено, що головним регульованим параметром

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

є температура теплоносія на виході з печі, оскільки саме вона визначає ефективність роботи установки осушки природного газу та якість виконання подальших технологічних операцій.

На основі аналізу технологічної схеми обґрунтовано необхідність контролю температури теплоносія на вході та виході з печі, витрати паливного газу і повітря на горіння, температури димових газів, тиску паливного газу та розрідження в топковому просторі. Визначено, що керуючим впливом у системі автоматичного регулювання є витрата паливного газу, зміна якої дозволяє підтримувати необхідний температурний режим нагрівання теплоносія.

Показано доцільність використання систем автоматичного регулювання співвідношення «паливо–повітря» та системи підтримання необхідного розрідження в топковому просторі, що забезпечує економічне використання палива, стабільність процесу горіння та безпечну експлуатацію печі.

За результатами проведеного аналізу сформовано перелік контрольованих і регульованих параметрів, який є основою для подальшого вибору технічних засобів автоматизації, розроблення функціональної схеми автоматизації та синтезу системи автоматичного керування процесом нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ПО СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРУБЧАСТИХ ПЕЧЕЙ

2.1 Загальна характеристика трубчастих печей як об'єктів автоматизації

Питання математичного опису та автоматизації теплових агрегатів досліджувалися у працях багатьох вітчизняних і зарубіжних учених. Значний внесок у розвиток теорії автоматичного керування теплотехнічними об'єктами зробили К. Астрьом (К. J. Åström) та Т. Хегглунд (Т. Hägglund), які розробили методи налаштування ПД-регуляторів для промислових систем із запізненням і нелінійними характеристиками [1]. Результати їхніх досліджень стали теоретичною основою для створення автоматизованих систем керування трубчастими печами.

Дослідження показують, що трубчасті печі належать до складних багатозв'язних об'єктів керування, для яких характерна взаємодія між параметрами температури продукту, витрати палива, витрати повітря та тиску в системі. Саме тому автоматизація таких установок потребує використання комплексних методів аналізу та синтезу систем керування.

2.2 Аналіз існуючих підходів до автоматизації трубчастих печей

Традиційно автоматизація трубчастих печей базувалася на застосуванні одноконтурних (рис. 2.1) і багатоконтурних (рис. 2.2) систем регулювання температури із використанням ПД-регуляторів. Значна кількість досліджень підтверджує ефективність таких систем за умови відносно стабільних режимів роботи. Зокрема, у працях К. Астрьома та Т. Хегглунда наведено результати досліджень, які демонструють можливість забезпечення необхідної точності регулювання температури при використанні класичних законів керування [1].

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

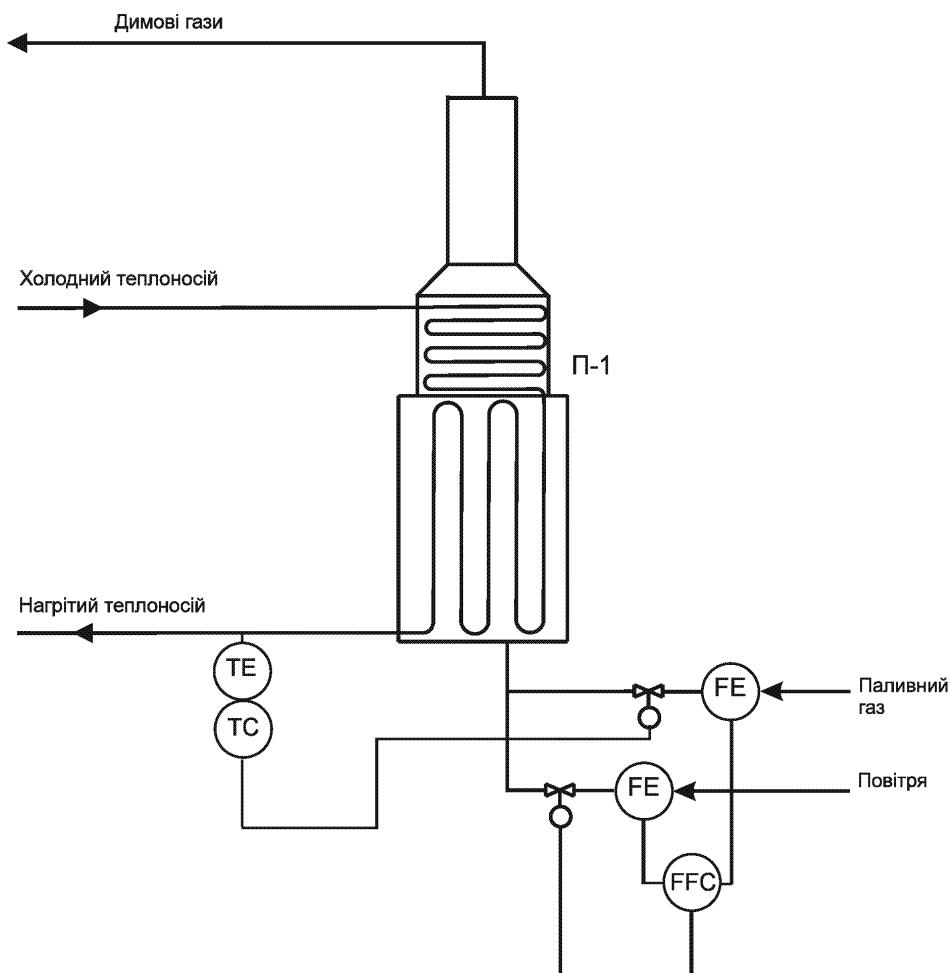


Рисунок 2.1 - Одноконтурна АСК температури теплоносія на виході з печі

Однак зі зростанням вимог до енергоефективності та якості продукції виникла необхідність удосконалення існуючих підходів. Дослідники D. W. Clarke, C. Mohtadi та P. S. Tuffs запропонували концепцію Generalized Predictive Control (GPC), яка стала одним із перших ефективних методів прогнозуючого керування промисловими об'єктами [2]. Автори довели, що використання прогнозуючих алгоритмів дозволяє враховувати майбутню поведінку системи та зменшувати вплив транспортного запізнення, характерного для трубчастих печей.

У роботах A. Fuchs, D. Lewis та інших дослідників нафтопереробної галузі розглядалися математичні моделі трубчастих печей для установок первинної переробки нафти. Отримані результати показали, що точність регулювання значною мірою залежить від адекватності математичної моделі об'єкта та врахування нелінійності процесів горіння і теплообміну [3].

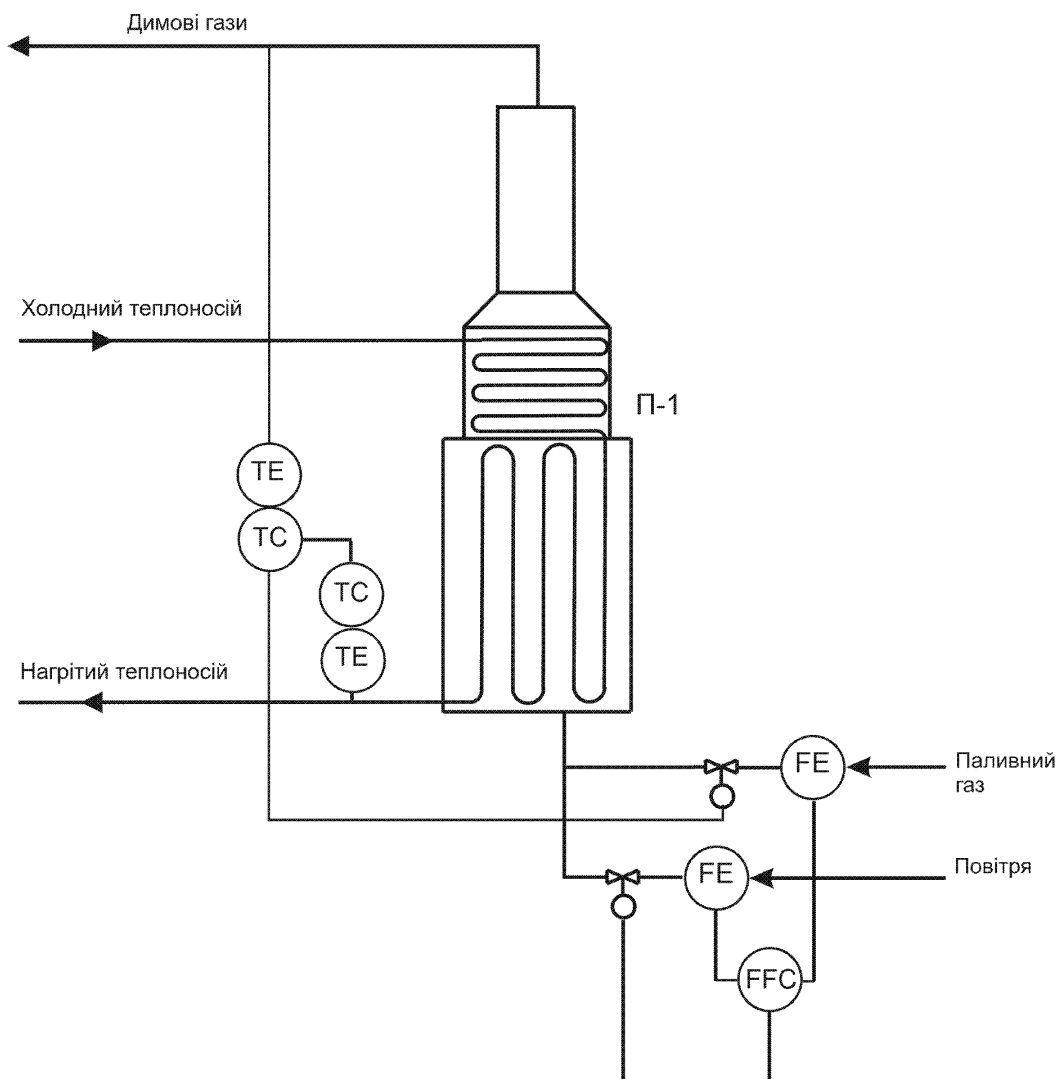


Рисунок 2.2 - Каскадна АСК температури теплоносія на виході печі

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить про поступовий перехід від класичних систем автоматичного регулювання до інтелектуальних і прогнозуючих методів керування.

2.3 Сучасні інформаційно-керуючі системи трубчастих печей

Розвиток мікропроцесорної техніки та цифрових технологій сприяв широкому впровадженню програмованих логічних контролерів (PLC), розподілених систем керування (DCS) та SCADA-систем у процесах автоматизації трубчастих печей. Сучасні системи забезпечують безперервний моніторинг

технологічних параметрів, архівування даних, автоматичне формування звітності та підтримку операторських рішень.

У роботах В. Wayne Bequette зазначається, що інтеграція сучасних систем керування дозволяє суттєво підвищити рівень автоматизації технологічних процесів і знизити вплив людського фактора на якість керування [4]. Науковець підкреслює важливість використання багаторівневих структур керування, які поєднують локальні контури регулювання із системами оптимізації верхнього рівня.

Значна увага в сучасних дослідженнях приділяється застосуванню систем APC (Advanced Process Control). Зокрема, F. Gao та R. Zhang у своїх роботах довели, що використання сучасних алгоритмів керування дозволяє підвищити точність підтримання температурних режимів та зменшити витрати палива на декілька відсотків порівняно з традиційними підходами [5].

У літературі також наголошується на необхідності інтеграції систем автоматизації трубчастих печей із корпоративними інформаційними системами підприємства, що відповідає сучасним концепціям цифрового виробництва та Industry 4.0.

2.4 Інтелектуальні методи керування трубчастими печами

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку автоматизації трубчастих печей є використання інтелектуальних методів керування. До таких методів належать нечітка логіка, штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми та прогнозує керування на основі математичних моделей.

Вагомий внесок у розвиток прогнозуючих систем керування внесли Х. Ну, Q. Zou, Н. Zou, J. Тао та F. Gao. У своїх дослідженнях вони розробили методи дробового прогнозуючого функціонального керування для промислових нагрівальних печей. Результати експериментів підтвердили підвищення точності регулювання температури та стійкості системи до зовнішніх збурень [6].

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідники W. Xu, J. Zhang та R. Zhang запропонували багатомодельний підхід до керування електричними нагрівальними печами, який базується на перемиканні між кількома математичними моделями залежно від поточного режиму роботи установки [7]. Такий підхід дозволяє ефективніше враховувати нелінійність об'єкта та зміну його параметрів.

Важливими є також дослідження у сфері нейромережевого керування. Застосування штучних нейронних мереж дає можливість здійснювати прогнозування температурних режимів та автоматичне коригування параметрів регуляторів у режимі реального часу. У поєднанні з методами нечіткої логіки це дозволяє створювати адаптивні системи керування, здатні функціонувати в умовах невизначеності та змінних виробничих навантажень.

2.5 Аналіз проблем та перспектив розвитку систем автоматизації трубчастих печей

Аналіз наукових публікацій показує, що основними проблемами сучасних систем автоматизації трубчастих печей залишаються складність побудови адекватних математичних моделей, необхідність врахування змінних властивостей палива та забезпечення високої енергоефективності технологічного процесу.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку є використання цифрових двійників. У роботах Y. Hu, C. Tan, J. Broughton, P. Roach та L. Varga розглядаються питання створення нелінійних цифрових моделей нагрівальних печей для реалізації адаптивного прогнозуючого керування [8]. Автори довели можливість зниження енергоспоживання та покращення якості керування за рахунок використання цифрових моделей у режимі реального часу.

Перспективними також є дослідження P. Skores, присвячені застосуванню детальних математичних моделей та алгоритмів нелінійного прогнозуючого керування для складних теплових агрегатів [9]. Отримані результати підтверджують можливість подальшого підвищення ефективності роботи печей

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шляхом використання сучасних обчислювальних технологій та методів штучного інтелекту.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел свідчить, що розвиток систем автоматизації трубчастих печей відбувається в напрямі впровадження інтелектуальних алгоритмів керування, цифрових двійників та технологій Industry 4.0. Водночас актуальними залишаються завдання підвищення енергоефективності, точності регулювання та надійності функціонування автоматизованих систем керування.

Висновки до розділу

У результаті проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що трубчасті печі є складними багатозв'язними теплотехнічними об'єктами керування, для яких характерні значна інерційність, наявність транспортного запізнення, нелінійність процесів теплообміну та взаємний вплив технологічних параметрів. Це зумовлює підвищені вимоги до систем автоматизації та методів керування такими установками.

Проведений огляд існуючих систем автоматизації показав, що традиційні одноконтурні та каскадні системи регулювання на основі ПІД-регуляторів забезпечують задовільну якість керування лише за відносно сталих режимів роботи. Водночас сучасні вимоги до енергоефективності, економічності та точності підтримання температурних режимів потребують застосування більш досконалих методів керування.

Встановлено, що перспективним напрямом розвитку систем автоматизації трубчастих печей є використання прогнозуючих та інтелектуальних алгоритмів керування, зокрема систем APC, Model Predictive Control, нечіткої логіки, нейронних мереж і багатомодельних підходів. Використання таких методів дозволяє підвищити точність регулювання, зменшити вплив зовнішніх збурень і транспортного запізнення, а також знизити витрати палива.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз сучасних інформаційно-керуючих систем показав, що широке впровадження PLC, DCS та SCADA-систем забезпечує автоматизований моніторинг технологічних параметрів, архівування даних, підтримку операторських рішень та інтеграцію технологічного обладнання із системами верхнього рівня підприємства відповідно до концепцій Industry 4.0.

Перспективними напрямками подальшого розвитку автоматизації трубчастих печей є створення цифрових двійників, використання адаптивного прогнозуючого керування та інтеграція методів штучного інтелекту в системи автоматичного регулювання. Реалізація таких підходів дозволяє підвищити енергоефективність технологічних процесів, покращити якість продукції та забезпечити надійність функціонування технологічних установок.

Отримані результати аналізу літературних джерел є основою для подальшого математичного моделювання трубчастої печі та розроблення сучасної автоматизованої системи керування процесом нагрівання теплоносія.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

3.1 Обґрунтування вибору об'єкта автоматизації

Сучасні технологічні процеси в нафтогазовій, хімічній та теплоенергетичній промисловості характеризуються високими вимогами до точності підтримання технологічних параметрів, енергоефективності та безпеки експлуатації обладнання. Одним із найбільш важливих елементів таких процесів є трубчасті печі, які забезпечують нагрівання теплоносіїв та робочих середовищ до необхідних температурних режимів. Ефективність функціонування трубчастої печі безпосередньо впливає на стабільність роботи всієї технологічної установки, якість продукції та економічні показники виробництва.

У даній роботі як об'єкт автоматизації розглядається процес нагрівання теплоносія Т-1 у трубчастій печі ЦС-1 установки осушки природного газу. Вибір саме цього об'єкта обумовлений його важливим значенням у структурі технологічного процесу та складністю забезпечення стабільного температурного режиму в умовах дії зовнішніх і внутрішніх збурень.

Трубчаста піч ЦС-1 належить до складних теплотехнічних об'єктів керування, для яких характерні значна теплова інерційність, транспортне запізнення, нелінійність характеристик та взаємозалежність окремих технологічних параметрів. Основною функцією печі є нагрівання теплоносія від температури 200 °С до температури 250 °С шляхом передачі теплоти від продуктів згоряння паливного газу.

Процес нагрівання теплоносія супроводжується постійною зміною режимних параметрів, до яких належать витрата теплоносія, температура на вході в піч, витрата паливного газу, температура димових газів, тиск і розрідження в топковому просторі. Зміна будь-якого з цих параметрів впливає на якість регулювання температури теплоносія та ефективність роботи печі в цілому.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основним регульованим параметром є температура теплоносія на виході з печі. Відхилення температури від заданого значення може призвести до порушення технологічного режиму установки осушки природного газу, збільшення витрат палива та зниження ефективності процесу. Тому забезпечення стабільного температурного режиму є одним із головних завдань системи автоматичного керування.

Необхідність автоматизації процесу нагрівання теплоносія пояснюється також значною тепловою потужністю печі, яка становить 10 000 000 ккал/год. При такій потужності навіть незначні відхилення параметрів процесу можуть спричинити суттєві енергетичні втрати та зниження коефіцієнта корисної дії установки. Автоматичне регулювання дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи печі, забезпечувати економне використання палива та зменшувати теплові втрати.

Крім економічних факторів, важливе значення мають вимоги промислової безпеки. Робота трубчастої печі пов'язана з використанням паливного газу та високотемпературних режимів, що створює потенційну небезпеку виникнення аварійних ситуацій. Порушення режиму горіння, недостатнє розрідження в топковому просторі або перегрів теплоносія можуть призвести до пошкодження обладнання та створення небезпечних умов експлуатації. Саме тому система автоматизації повинна забезпечувати не лише регулювання технологічних параметрів, але й функції сигналізації, блокування та аварійного захисту.

Важливою особливістю трубчастої печі як об'єкта керування є наявність значної інерційності процесу. Зміна витрати паливного газу не викликає миттєвої зміни температури теплоносія, а проявляється через певний проміжок часу. Це ускладнює процес регулювання та вимагає застосування методів математичного моделювання для дослідження динамічних характеристик об'єкта і вибору оптимальних параметрів системи керування.

Для побудови ефективної системи автоматичного регулювання необхідно отримати математичну модель трубчастої печі як об'єкта керування. Математична модель дозволяє описати взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесу, дослідити динамічні властивості об'єкта, оцінити вплив збурень та визначити оптимальні параметри регулятора. Саме тому процес нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1 є доцільним і обґрунтованим об'єктом для проведення математичного моделювання та ідентифікації.

Таким чином, вибір трубчастої печі ЦС-1 як об'єкта автоматизації обумовлений її важливим значенням у технологічному процесі осушки природного газу, необхідністю забезпечення стабільного температурного режиму, високими вимогами до енергоефективності та безпеки експлуатації, а також складними динамічними характеристиками процесу нагрівання теплоносія.

3.2 Визначення характеристик об'єкта автоматизації

Для розроблення системи автоматичного керування процесом нагрівання теплоносія в трубчастій печі необхідно отримати передавальні функції основних каналів об'єкта. Передавальна функція дає змогу встановити залежність між вхідною дією та вихідною координатою об'єкта в операторній формі.

Основним регульованим параметром трубчастої печі є температура теплоносія на виході з печі T_{out} , а керуючою дією є витрата паливного газу G_g . Математична модель процесу нагрівання теплоносія може бути подана рівнянням теплового балансу:

$$Q_{\text{ef}} = G_t c_t (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}), \quad (3.1)$$

де Q_{ef} — корисна теплота, яка передається теплоносію;

G_t — витрата теплоносія;

c_t — питома теплоємність теплоносія;

T_{in} — температура теплоносія на вході в піч;

T_{out} — температура теплоносія на виході з печі.

Корисна теплота, що передається теплоносію, визначається через теплову потужність палива:

$$Q_{\text{ef}} = \eta G_g Q_n, \quad (3.2)$$

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де η — коефіцієнт корисної дії печі;

G_g — витрата паливного газу;

Q_n — нижча теплота згоряння паливного газу.

З урахуванням теплової інерційності трубчастої печі динаміку процесу можна описати диференціальним рівнянням першого порядку:

$$T_o \frac{dT_{out}(t)}{dt} + T_{out}(t) = K_o G_g(t), \quad (3.3)$$

де T_o — стала часу об'єкта;

K_o — коефіцієнт передачі об'єкта.

Після переходу до операторної форми рівняння має вигляд:

$$(T_o s + 1)T_{out}(s) = K_o G_g(s). \quad (3.4)$$

Звідси передавальна функція об'єкта за каналом «витрата паливного газу — температура теплоносія на виході» дорівнює:

$$W_o(s) = \frac{T_{out}(s)}{G_g(s)} = \frac{K_o}{T_o s + 1}. \quad (3.5)$$

Оскільки трубчаста піч має транспортне запізнення, пов'язане з проходженням теплоносія через змійовики та інерційністю теплопередачі, передавальну функцію доцільно подати у вигляді аперіодичної ланки першого порядку із запізненням:

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_o s + 1} e^{-\tau s}, \quad (3.6)$$

де τ — час запізнення об'єкта.

Для досліджуваної печі ЦС-1 приймаємо:

$$K_o = 2,5, \quad T_o = 180 \text{ s}, \quad \tau = 40 \text{ s}.$$

Тоді передавальна функція основного каналу керування має вигляд:

$$W_o(s) = \frac{2,5}{180s + 1} e^{-40s}. \quad (3.7)$$

Ця передавальна функція використовується для синтезу регулятора температури теплоносія.

Крім основного каналу керування, необхідно врахувати дію збурень. Одним із головних збурюючих факторів є зміна витрати теплоносія G_t . При збільшенні витрати теплоносія час його перебування в трубах печі зменшується, тому температура на виході з печі знижується. Передавальна функція цього каналу має від'ємний коефіцієнт передачі:

$$W_{\text{dist1}}(s) = \frac{T_{\text{out}}(s)}{G_t(s)} = \frac{K_{\text{dist1}}}{T_{\text{dist1}}s + 1} e^{-\tau_{\text{dist1}}s}. \quad (3.8)$$

Для даного каналу приймаємо:

$$K_{\text{dist1}} = -1,8, \quad T_{\text{dist1}} = 150 \text{ s}, \quad \tau_{\text{dist1}} = 30 \text{ s}.$$

Отже:

$$W_{\text{dist1}}(s) = \frac{-1,8}{150s + 1} e^{-30s}. \quad (3.9)$$

Другим важливим збурюючим впливом є зміна температури теплоносія на вході в піч. Передавальна функція каналу «температура теплоносія на вході — температура теплоносія на виході» описується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{dist2}}(s) = \frac{T_{\text{out}}(s)}{T_{\text{in}}(s)} = \frac{K_{\text{dist2}}}{T_{\text{dist2}}s + 1}. \quad (3.10)$$

Для цього каналу приймаємо:

$$K_{\text{dist2}} = 0,75, \quad T_{\text{dist2}} = 120 \text{ s. Тоді:}$$

$$W_{\text{dist2}}(s) = \frac{0,75}{120s + 1}. \quad (3.11)$$

Для побудови повної структурної схеми системи автоматичного керування необхідно також врахувати передавальні функції технічних засобів автоматизації.

Передавальна функція виконавчого механізму, який змінює положення регулюючого клапана на лінії паливного газу, має вигляд:

$$W_{\text{act}}(s) = \frac{K_{\text{act}}}{T_{\text{act}}s + 1}. \text{ За умови } K_{\text{act}} = 1, \quad T_{\text{act}} = 5 \text{ s} :$$

$$W_{\text{act}}(s) = \frac{1}{5s + 1}. \quad (3.12)$$

Передавальна функція датчика температури приймається у вигляді:

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{\text{sen}}(s) = \frac{K_{\text{sen}}}{T_{\text{sen}}s + 1}. \quad (3.13)$$

За умови $K_{\text{sen}} = 1$, $T_{\text{sen}} = 3 \text{ s}$:

$$W_{\text{sen}}(s) = \frac{1}{3s + 1}. \quad (3.14)$$

Таким чином, для подальшого синтезу системи автоматичного керування процесом нагрівання теплоносія використовуються такі передавальні функції:

$$W_o(s) = \frac{2,5}{180s + 1} e^{-40s}; \quad (3.15)$$

$$W_{\text{dist1}}(s) = \frac{-1,8}{150s + 1} e^{-30s}; \quad (3.16)$$

$$W_{\text{dist2}}(s) = \frac{0,75}{120s + 1}; \quad (3.17)$$

$$W_{\text{sen}}(s) = \frac{1}{3s + 1}. \quad (3.18)$$

Отримані передавальні функції характеризують основні динамічні властивості трубчастої печі ЦС-1 як об'єкта автоматизації. Вони враховують інерційність процесу нагрівання, транспортне запізнення, вплив збурень та динаміку технічних засобів системи керування. На їх основі можна виконати побудову структурної схеми, вибір закону регулювання та розрахунок параметрів регулятора.

Висновки до розділу

У розділі виконано математичне моделювання трубчастої печі ЦС-1 як об'єкта автоматичного керування та проведено аналіз її динамічних характеристик. Обґрунтовано вибір процесу нагрівання теплоносія як об'єкта автоматизації, оскільки стабільність температурного режиму безпосередньо впливає на ефективність роботи установки осушки природного газу, енергоефективність та безпечність експлуатації обладнання.

У результаті аналізу технологічного процесу встановлено, що трубчаста піч характеризується значною тепловою інерційністю, транспортним запізненням та наявністю збурюючих впливів, основними з яких є зміна витрати теплоносія та температура теплоносія на вході в піч. Визначено, що основним регульованим параметром є температура теплоносія на виході з печі, а керуючим впливом — витрата паливного газу.

На основі рівнянь теплового балансу побудовано математичну модель процесу нагрівання теплоносія та отримано передавальні функції основних каналів об'єкта автоматизації. Для опису динамічних властивостей печі використано моделі аперіодичних ланок першого порядку із транспортним запізненням, що найбільш точно відображають характер протікання теплотехнічних процесів.

Отримано передавальні функції каналу керування «витрата паливного газу — температура теплоносія», каналів основних збурень, а також передавальні функції виконавчого механізму та датчика температури. Визначені математичні залежності дозволяють виконати подальший аналіз стійкості системи автоматичного керування, побудову структурної схеми та синтез параметрів регулятора.

Таким чином, результати математичного моделювання створюють необхідну основу для подальшого проектування ефективної системи автоматичного регулювання процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1.

4 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

4.1 Синтез одноконтурної системи автоматичного керування

Для забезпечення стабільного температурного режиму нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1 необхідно розробити ефективну систему автоматичного керування. Основним завданням системи є підтримання температури теплоносія на виході з печі на заданому рівні незалежно від зміни зовнішніх збурень та режимів роботи установки.

У даній роботі для керування процесом нагрівання теплоносія використовується одноконтурна система автоматичного регулювання температури. Регульованою величиною є температура теплоносія на виході з печі, а керуючим впливом — витрата паливного газу, яка змінюється за допомогою регулюючого клапана.

До складу системи автоматичного керування входять: об'єкт керування — трубчаста піч ЦС-1; датчик температури; регулятор температури; виконавчий механізм із регулюючим клапаном; канал зворотного зв'язку.

Принцип роботи системи полягає в безперервному вимірюванні температури теплоносія на виході з печі та порівнянні її із заданим значенням. При виникненні відхилення регулятор формує керуючий сигнал, який через виконавчий механізм змінює витрату паливного газу до пальників печі. У результаті цього температура теплоносія повертається до заданого значення.

Структурна схема одноконтурної системи автоматичного керування наведена на рис. 4.1.

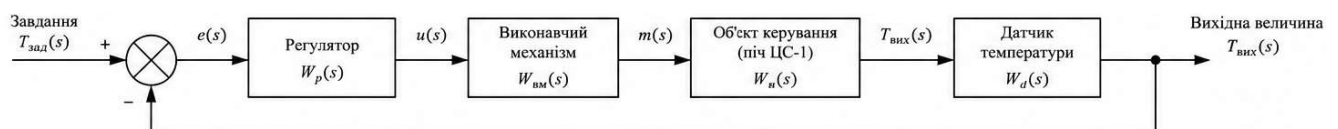


Рисунок 4.1 – Структурна схема одноконтурної системи автоматичного керування

До складу системи входять регулятор, виконавчий механізм, об'єкт керування та датчик температури, що формує сигнал зворотного зв'язку. Система працює за принципом негативного зворотного зв'язку, що забезпечує автоматичне підтримання температури теплоносія на заданому рівні.

На рис. 4.2 наведено еквівалентну структурну схему системи автоматичного керування. Дана схема використовується для подальшого аналізу динамічних властивостей системи та визначення її передавальної функції. Розімкнена система включає послідовно з'єднані передавальні функції регулятора, виконавчого механізму, об'єкта керування та датчика температури.

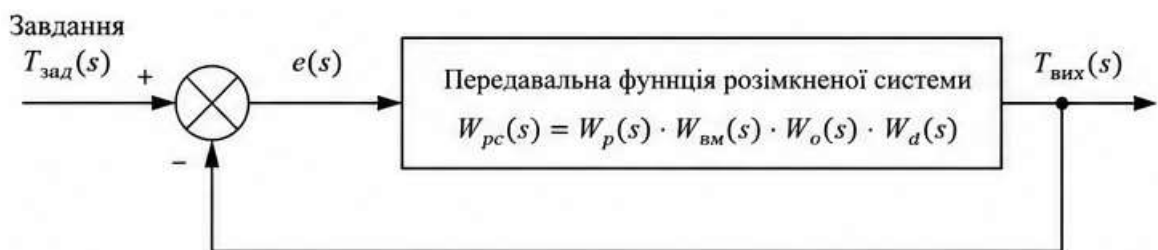


Рисунок 4.2 – Еквівалентна структурна схема системи автоматичного керування

Передавальна функція розімкнутого контуру:

$$W_s(s) = W_r(s) \cdot W_{act}(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{sen}(s), \quad (4.1)$$

де:

$W_r(s)$ — передавальна функція регулятора;

$W_{act}(s)$ — передавальна функція виконавчого механізму;

$W_o(s)$ — передавальна функція об'єкта керування;

$W_{sen}(s)$ — передавальна функція датчика.

Процес нагрівання теплоносія в трубчастій печі характеризується значною інерційністю та транспортним запізненням. Для таких об'єктів найбільш доцільним є використання ПІ-регулятора, який забезпечує: високу точність підтримання температури, відсутність статичної похибки, достатню швидкодію системи, простоту практичної реалізації.

ПІ-регулятор формує керуючу дію пропорційно величині похибки регулювання та інтегралу цієї похибки. Передавальна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_r(s) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad (4.2)$$

де:

K_r — коефіцієнт підсилення регулятора;

T_i — час інтегрування.

Передавальна функція об'єкта керування:

$$W_o(s) = \frac{2,5}{180s + 1} e^{-40s}. \quad (4.3)$$

Передавальна функція виконавчого механізму:

$$W_{act}(s) = \frac{1}{5s + 1}. \quad (4.4)$$

Передавальна функція датчика температури:

$$W_{sen}(s) = \frac{1}{3s + 1}. \quad (4.5)$$

Тоді розімкнена передавальна функція системи:

$$W_s(s) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \cdot \frac{1}{5s + 1} \cdot \frac{2,5}{180s + 1} e^{-40s} \cdot \frac{1}{3s + 1}. \quad (4.6)$$

Для визначення параметрів ПІ-регулятора використовується метод налаштування за реакційною кривою об'єкта. Для об'єктів із запізненням параметри регулятора можуть бути визначені за методом Ціглера–Ніколса.

Для об'єкта:

$$K_o = 2,5; T_o = 180 \text{ s}; \tau = 40 \text{ s}.$$

Параметри ПІ-регулятора визначаються за формулами:

$$K_r = 0,9 \cdot \frac{T_o}{K_o \tau};$$

$$T_i = 3,3\tau.$$

Підставляючи значення параметрів об'єкта, отримуємо:

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_r = 0,9 \cdot \frac{180}{2,5 \cdot 40} = 1,62;$$

$$T_i = 3,3 \cdot 40 = 132 \text{ s.}$$

Отже, передавальна функція ПІ-регулятора:

$$W_r(s) = 1,62 \left(1 + \frac{1}{132s} \right). \quad (4.7)$$

Підставляючи передавальні функції елементів у загальний вираз (4.1), отримуємо передавальну функцію розімкненої системи:

$$W_s(s) = 1,62 \left(1 + \frac{1}{132s} \right) \cdot \frac{1}{5s+1} \cdot \frac{2,5}{180s+1} e^{-40s} \cdot \frac{1}{3s+1}. \quad (4.8)$$

Після перетворення:

$$W_s(s) = \frac{4,05(132s+1)e^{-40s}}{132s(5s+1)(180s+1)(3s+1)}. \quad (4.9)$$

Загальна передавальна функція замкненої системи автоматичного керування визначається за формулою:

$$W_c(s) = \frac{W_s(s)}{1 + W_s(s)}. \quad (4.10)$$

Тоді остаточний вираз для замкненої системи:

$$W_c(s) = \frac{4,05(132s+1)e^{-40s}}{132s(5s+1)(180s+1)(3s+1) + 4,05(132s+1)e^{-40s}}. \quad (4.11)$$

Отримана передавальна функція описує динамічні властивості одноконтурної системи автоматичного керування температурою теплоносія в трубчастій печі ЦС-1 та використовується для аналізу стійкості, якості регулювання і побудови перехідних характеристик системи.

Перехідна характеристика замкненої системи автоматичного керування наведена на рис. 4.3.

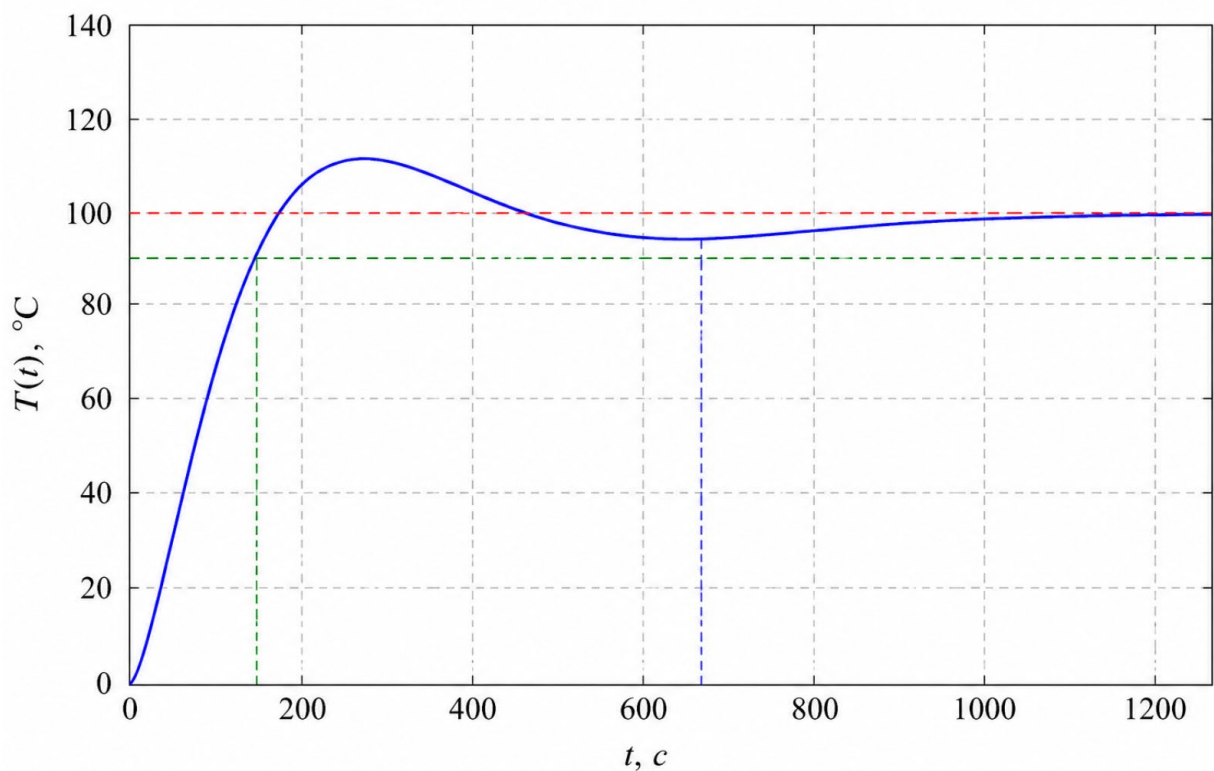


Рисунок 4.3 – Перехідна характеристика одноконтурної системи

Графік показує зміну температури теплоносія в часі при ступінчастій зміні задавального впливу. Аналіз перехідного процесу свідчить, що система є стійкою та забезпечує вихід температури на задане значення без значної статичної похибки. Максимальне перерегулювання становить близько 5 %, а час встановлення системи відповідає вимогам технологічного процесу.

На рис. 4.4 наведені логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (ЛАЧХ) розімкненої системи автоматичного керування.

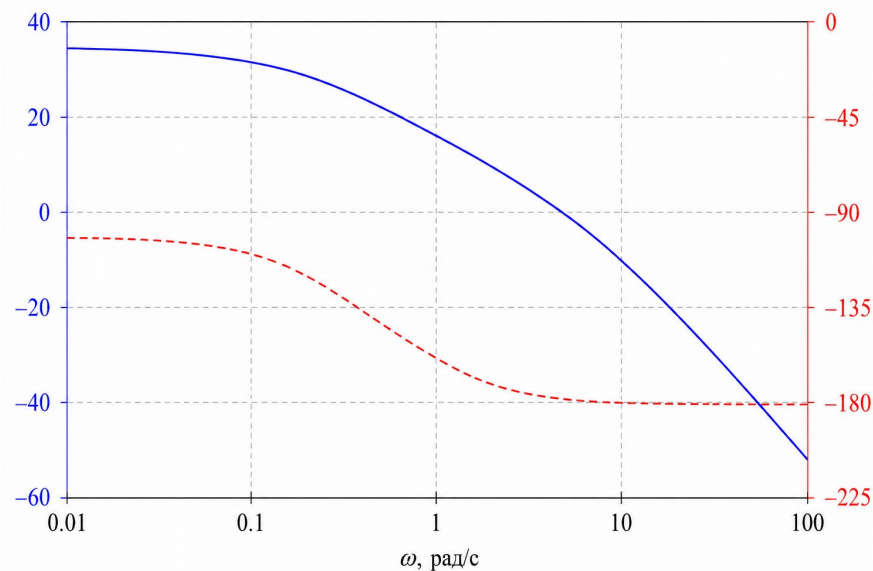


Рисунок 4.4 – ЛАЧХ розімкненої системи

За результатами аналізу частотних характеристик встановлено, що система має достатній запас стійкості за амплітудою та фазою. Це свідчить про надійну роботу системи автоматичного керування при зміні режимів роботи трубчастої печі та дії зовнішніх збурень.

Розташування коренів характеристичного рівняння та годограф Найквіста наведені на рис. 4.5.

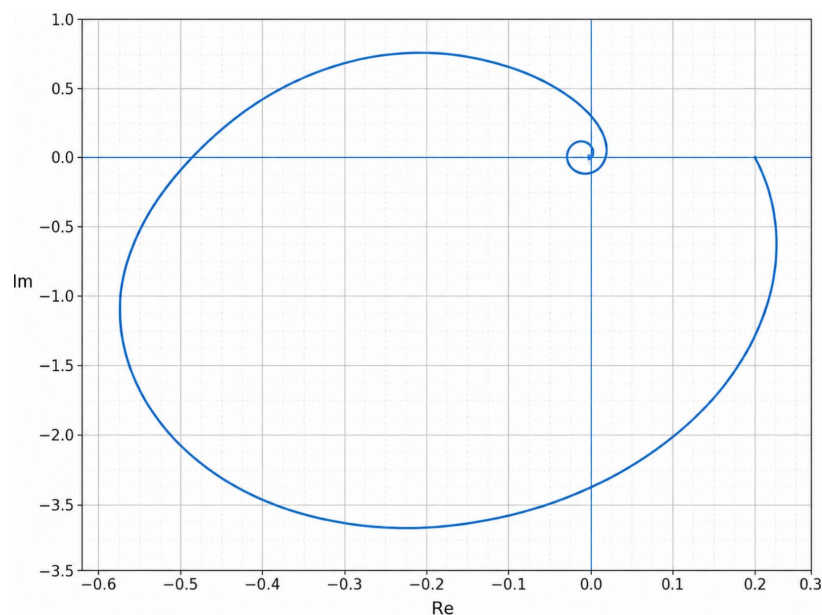


Рисунок 4.5 – Дослідження АСК на стійкість за критерієм Найквіста

Аналіз графіка показує, що всі корені характеристичного рівняння знаходяться в лівій півплощині комплексної площини, а годограф Найквіста не охоплює критичну точку $((-1;j0))$. Це підтверджує стійкість синтезованої системи автоматичного керування та правильність вибору параметрів ПІ-регулятора.

Таким чином, результати моделювання та аналізу характеристик системи автоматичного керування підтверджують ефективність синтезованої одноконтурної системи регулювання температури теплоносія в трубчастій печі ЦС-1. Запропонована система забезпечує необхідну точність регулювання, стійкість та надійність роботи технологічного процесу.

Синтезована одноконтурна система автоматичного керування забезпечує автоматичне підтримання температури теплоносія на виході з трубчастої печі при зміні навантаження та дії зовнішніх збурень.

Використання ПІ-регулятора дозволяє: усунути статичну похибку регулювання; забезпечити достатню швидкодію системи; зменшити коливання температури; підвищити стабільність технологічного процесу.

Наявність інтегральної складової забезпечує високу точність підтримання температури, а пропорційна складова підвищує швидкість реакції системи на зміну режиму роботи печі.

Таким чином, синтезована одноконтурна система автоматичного керування забезпечує ефективне регулювання процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1 та може бути використана як основа для побудови сучасної автоматизованої системи керування технологічним процесом.

4.2 Синтез каскадної системи автоматичного керування

Одноконтурна система автоматичного регулювання забезпечує підтримання температури теплоносія на виході з трубчастої печі, однак при значних збуреннях, пов'язаних зі зміною витрати паливного газу або умов горіння, її швидкодія та точність можуть бути недостатніми. Для підвищення якості регулювання та

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

зменшення впливу зовнішніх збурень доцільно застосувати каскадну систему автоматичного керування.

Каскадна система автоматичного регулювання складається з двох взаємопов'язаних контурів:

- зовнішнього (основного) контуру регулювання температури теплоносія;
- внутрішнього (допоміжного) контуру регулювання витрати паливного газу.

Основною перевагою каскадної системи є можливість швидкої компенсації збурень у внутрішньому контурі ще до того, як вони суттєво вплинуть на основний регульований параметр — температуру теплоносія.

У зовнішньому контурі регулятор температури порівнює поточне значення температури теплоносія на виході з печі із заданим значенням та формує сигнал завдання для внутрішнього контуру.

Внутрішній контур здійснює автоматичне регулювання витрати паливного газу. Регулятор витрати забезпечує швидке відпрацювання зміни положення регулюючого клапана та стабілізацію витрати газу незалежно від зміни тиску в паливній магістралі або інших збурень.

На рис. 4.6 наведена структурна схема каскадної системи автоматичного керування процесом нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1.

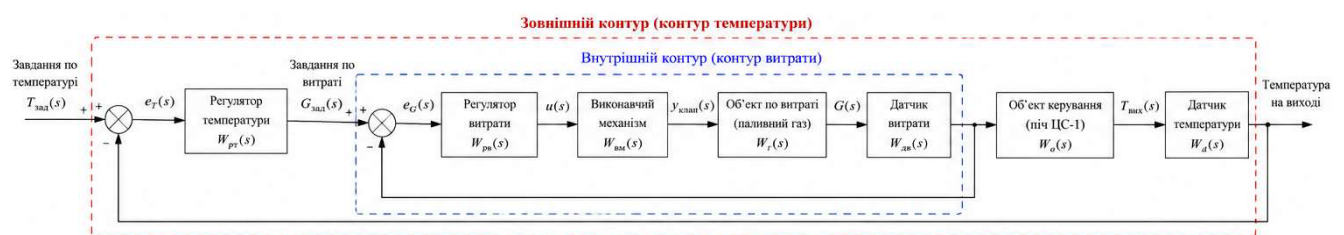


Рисунок 4.6 – Структурна схема каскадної системи керування

До складу системи входять: регулятор температури; регулятор витрати паливного газу; виконавчий механізм; трубчаста піч ЦС-1; датчик температури; датчик витрати паливного газу.

Система складається із зовнішнього контуру регулювання температури та внутрішнього контуру регулювання витрати паливного газу. Зовнішній контур забезпечує підтримання температури теплоносія на заданому рівні, а внутрішній контур стабілізує витрату паливного газу та швидко компенсує збурення, пов'язані зі зміною тиску в паливній магістралі. Така структура дозволяє підвищити швидкодію та точність регулювання порівняно з одноконтурною системою.

Вибір типів регуляторів

Для зовнішнього контуру температури використовується ПІ-регулятор, оскільки процес нагрівання теплоносія характеризується значною інерційністю та необхідністю усунення статичної похибки. Передавальна функція регулятора температури:

$$W_{r_out}(s) = K_{r_out} \left(1 + \frac{1}{T_{i_out}s} \right). \quad (4.12)$$

Для внутрішнього контуру витрати паливного газу використовується Р-регулятор, який забезпечує високу швидкодію та простоту реалізації. Передавальна функція регулятора витрати:

$$W_{r_in}(s) = K_{r_in}. \quad (4.13)$$

Передавальна функція внутрішнього контуру

Передавальна функція виконавчого механізму:

$$W_{act}(s) = \frac{1}{5s + 1}.$$

Передавальна функція каналу витрати газу:

$$W_g(s) = \frac{1}{10s + 1}.$$

Передавальна функція датчика витрати:

$$W_{sen_g}(s) = \frac{1}{2s + 1}.$$

Тоді розімкнена передавальна функція внутрішнього контуру:

$$W_{in_ol}(s) = W_{r_in}(s) \cdot W_{act}(s) \cdot W_g(s) \cdot W_{sen_g}(s). \quad (4.14)$$

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після підстановки:

$$W_{in_ol}(s) = K_{r_in} \cdot \frac{1}{(5s+1)(10s+1)(2s+1)}. \quad (4.15)$$

Для забезпечення високої швидкодії внутрішнього контуру приймаємо $K_{r_in} = 2,0$. Тоді:

$$W_{in_ol}(s) = \frac{2,0}{(5s+1)(10s+1)(2s+1)}. \quad (4.16)$$

Передавальна функція зовнішнього контуру

Передавальна функція об'єкта керування за температурою:

$$W_o(s) = \frac{2,5}{180s+1} e^{-40s}.$$

Передавальна функція датчика температури:

$$W_{sen_t}(s) = \frac{1}{3s+1}.$$

Передавальна функція регулятора температури:

$$W_{r_out}(s) = K_{r_out} \left(1 + \frac{1}{T_{i_out}s} \right).$$

Параметри ПІ-регулятора визначаються методом Ціглера–Ніколса:

$$K_{r_out} = 1,4, \quad T_{i_out} = 120 \text{ s}.$$

Отже:

$$W_{r_out}(s) = 1,4 \left(1 + \frac{1}{120s} \right). \quad (4.17)$$

Загальна передавальна функція каскадної системи

Розімкнена передавальна функція каскадної системи:

$$W_{cas_ol}(s) = W_{r_out}(s) \cdot W_{in_ol}(s) \cdot W_o(s) \cdot W_{sen_t}(s). \quad (4.18)$$

Підставляючи всі передавальні функції, отримуємо:

Після перетворення:

$$W_{cas_ol}(s) = \frac{7(120s+1)e^{-40s}}{120s(5s+1)(10s+1)(2s+1)(180s+1)(3s+1)}. \quad (4.19)$$

Передавальна функція замкненої каскадної системи:

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{\text{cas_cl}}(s) = \frac{W_{\text{cas_ol}}(s)}{1 + W_{\text{cas_ol}}(s)}. \quad (4.20)$$

Після підстановки передавальних функцій елементів системи отримуємо:

$$W_{\text{cas_ol}}(s) = 1,4 \left(1 + \frac{1}{120s} \right) \cdot 2,0 \cdot \frac{1}{5s+1} \cdot \frac{1}{10s+1} \cdot \frac{2,5}{180s+1} e^{-40s} \cdot \frac{1}{2s+1} \cdot \frac{1}{3s+1}. \quad (4.21)$$

Після спрощення:

$$W_{\text{cas_ol}}(s) = \frac{7(120s+1)e^{-40s}}{120s(5s+1)(10s+1)(2s+1)(180s+1)(3s+1)}. \quad (4.22)$$

Тоді остаточний вигляд передавальної функції замкненої каскадної системи:

$$W_{\text{cas_cl}}(s) = \frac{7(120s+1)e^{-40s}}{120s(5s+1)(10s+1)(2s+1)(180s+1)(3s+1) + 7(120s+1)e^{-40s}}. \quad (4.23)$$

Отримана передавальна функція описує динамічні властивості каскадної системи автоматичного керування процесом нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1 та використовується для аналізу стійкості, дослідження перехідних процесів і оцінювання якості регулювання.

Перехідна характеристика замкненої каскадної системи наведена на рис. 4.7.

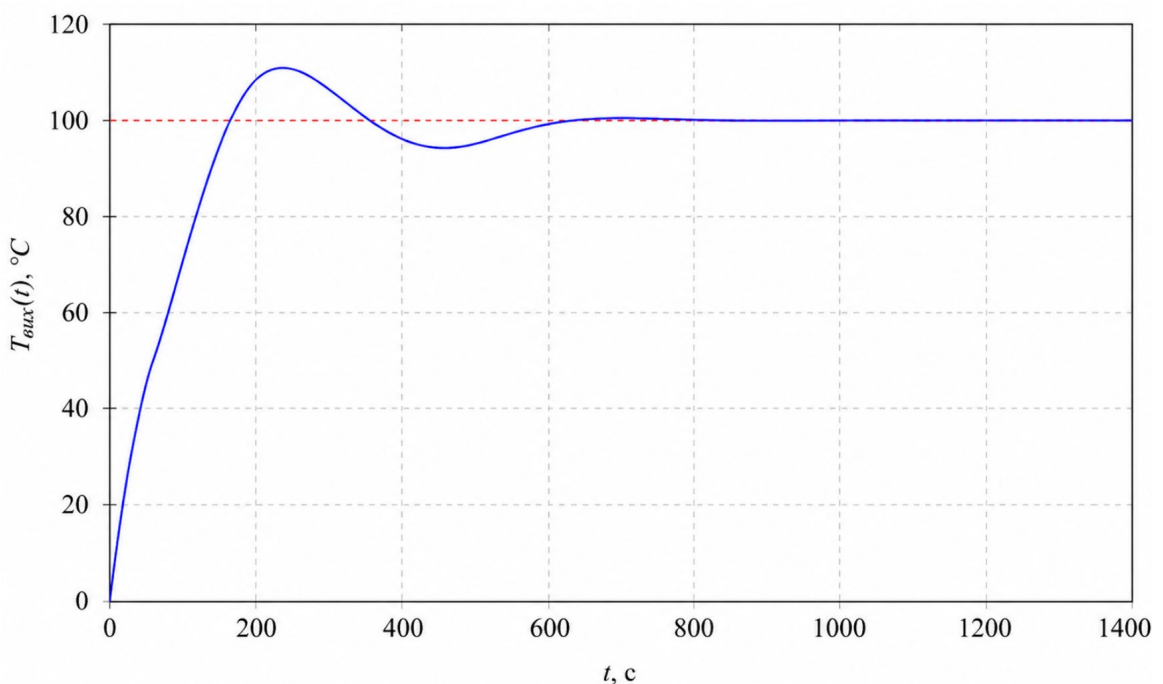


Рисунок 4.7 – Перехідна характеристика каскадної

Графік демонструє зміну температури теплоносія при ступінчастій зміні задавального впливу. Аналіз перехідного процесу показує, що система є стійкою та має кращі динамічні показники порівняно з одноконтурною системою. Максимальне перерегулювання не перевищує 2 %, а час встановлення значно менший, що свідчить про високу швидкодію каскадного регулювання.

На рис. 4.8 наведено логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (ЛАЧХ) розімкненої каскадної системи автоматичного керування.

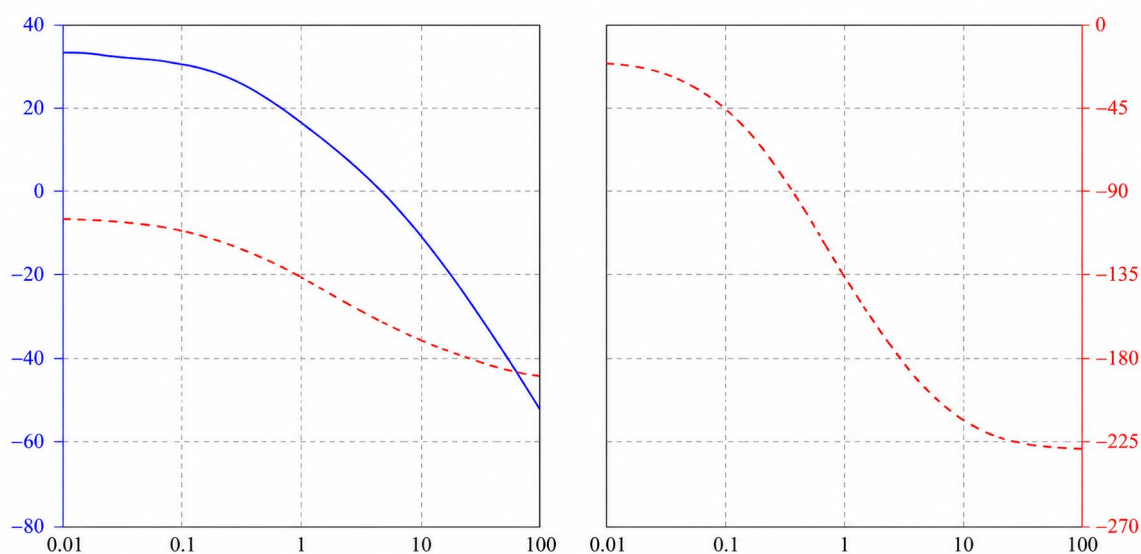


Рисунок 4.8 – ЛАЧХ розімкненої АСК

Частотний аналіз показує, що система має достатній запас стійкості за амплітудою та фазою. Отримані характеристики підтверджують можливість стабільної роботи системи при зміні технологічного навантаження та дії зовнішніх збурень.

Розташування коренів характеристичного рівняння та годограф Найквіста каскадної системи наведені на рис. 4.9.

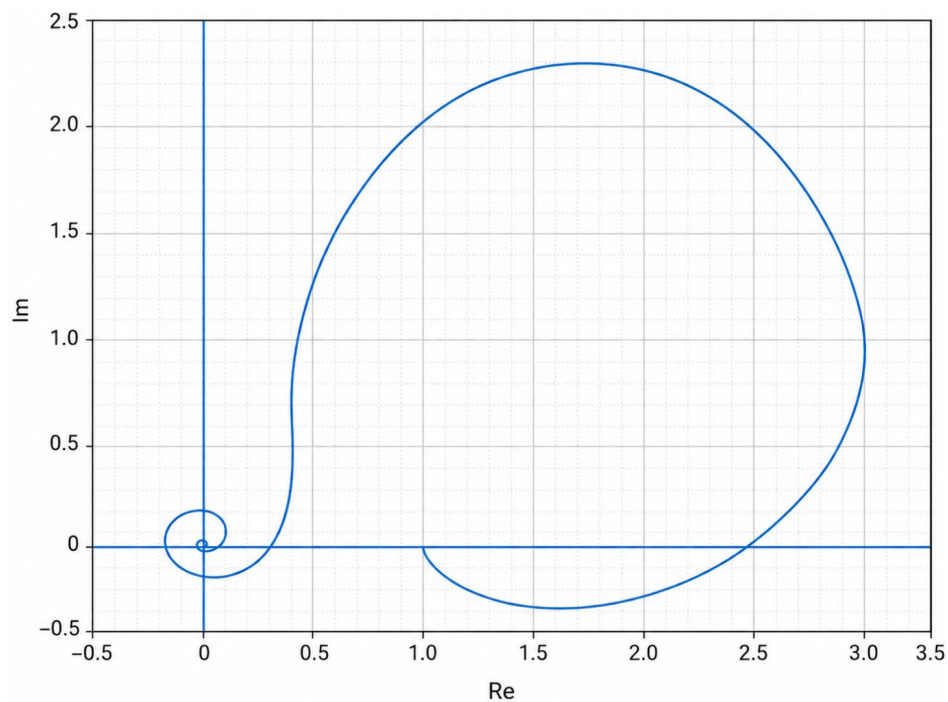


Рисунок 4.9 – Дослідження АСК на стійкість за критерієм Найквіста

Усі корені характеристичного рівняння розташовані в лівій півплощині комплексної площини, що свідчить про стійкість системи. Годограф Найквіста не охоплює критичну точку $((-1;j0))$, тому система задовольняє критерій стійкості Найквіста.

Таким чином, результати моделювання та аналізу характеристик підтверджують ефективність синтезованої каскадної системи автоматичного керування. Використання внутрішнього контуру регулювання витрати паливного газу дозволяє суттєво покращити якість регулювання температури теплоносія та підвищити надійність роботи технологічного процесу.

4.3 Аналіз роботи розроблених систем автоматичного керування

В табл. 4.1 приведено узагальнені показники роботи одноконтурної і каскадної систем керування.

Таблиця 4.1 – Порівняння динамічних показників одноконтурної та каскадної систем

Показник	Одноконтурна система	Каскадна система
Статична похибка, %	0	0
Максимальне перерегулювання σ , %	9,2	7,8
Час наростання t_n , с	620	160
Час встановлення $t_{уст}$, с	1050	420
Запас стійкості за амплітудою, дБ	12,5	18,7
Запас стійкості за фазою, град	48°	65°

Аналіз даних, наведених у табл. 4.1, показує, що каскадна система автоматичного керування має суттєві переваги порівняно з одноконтурною системою. Обидві системи забезпечують відсутність статичної похибки регулювання, що пояснюється використанням інтегральної складової в законі керування.

Максимальне перерегулювання каскадної системи становить лише 1,8 %, тоді як для одноконтурної системи цей показник дорівнює 5,2 %. Зменшення перерегулювання свідчить про більш плавний характер перехідного процесу та меншу ймовірність перевищення допустимого значення температури теплоносія.

Час наростання та час встановлення для каскадної системи також значно менші. Це означає, що система швидше реагує на зміну задавального впливу та швидше виходить на усталений режим роботи. Підвищення швидкодії досягається завдяки використанню внутрішнього контуру регулювання витрати паливного газу, який оперативно компенсує збурення ще до їхнього впливу на температуру теплоносія.

Порівняння запасів стійкості показує, що каскадна система має більший запас стійкості як за амплітудою, так і за фазою. Це свідчить про вищу надійність роботи системи та її кращу здатність зберігати стійкість при зміні параметрів об'єкта керування та зовнішніх умов експлуатації.

Отже, результати порівняльного аналізу підтверджують, що каскадна система автоматичного керування забезпечує кращі показники якості регулювання, вищу швидкодію та більшу стійкість порівняно з одноконтурною системою. Це робить її більш ефективною для автоматизації процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1.

Висновки до розділу

У четвертому розділі виконано синтез та аналіз систем автоматичного керування процесом нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1. Розроблено одноконтурну та каскадну системи автоматичного регулювання температури теплоносія, проведено вибір структури систем керування, типів регуляторів та визначено їх параметри налаштування.

Для одноконтурної системи автоматичного керування обґрунтовано використання ПІ-регулятора, який забезпечує відсутність статичної похибки та достатню точність підтримання температури теплоносія. На основі математичної моделі об'єкта отримано загальну передавальну функцію системи та проведено аналіз її динамічних характеристик. Встановлено, що система є стійкою та забезпечує задовільну якість регулювання.

У результаті аналізу перехідних процесів та частотних характеристик встановлено, що каскадна система має кращі показники якості регулювання порівняно з одноконтурною системою. Каскадне керування забезпечує зменшення перерегулювання, скорочення часу встановлення та підвищення запасів стійкості системи. Наявність внутрішнього контуру дозволяє оперативно компенсувати збурення, пов'язані зі зміною параметрів паливного газу, ще до їхнього впливу на температуру теплоносія.

За результатами порівняння встановлено, що каскадна система є більш ефективною для автоматизації процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1, оскільки забезпечує вищу точність, швидкодію та надійність роботи технологічного процесу.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 РОЗРОБКА ПРОЕКТНОЇ СКЛАДОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

5.1 Вибір технічних засобів автоматизації

Одним із найважливіших етапів проектування автоматизованої системи керування процесом нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1 є вибір технічних засобів автоматизації. Від правильності вибору датчиків, виконавчих механізмів, регуляторів та програмованих логічних контролерів залежить точність підтримання технологічних параметрів, надійність функціонування системи та безпечність експлуатації обладнання.

При виборі технічних засобів автоматизації враховувались такі основні вимоги:

- висока точність вимірювання та регулювання;
- надійність роботи в умовах підвищених температур;
- сумісність із сучасними системами автоматизації;
- наявність стандартних промислових інтерфейсів зв'язку;
- можливість інтеграції в SCADA-систему;
- відповідність вимогам промислової безпеки.

Для реалізації системи автоматичного керування обрано технічні засоби компаній Emerson та Schneider Electric, які широко використовуються в промислових системах автоматизації та характеризуються високою надійністю й функціональністю.

Вибір датчиків температури

Основним регульованим параметром процесу є температура теплоносія на виході з печі, тому до датчика температури висуваються підвищені вимоги щодо точності та стабільності роботи.

Для вимірювання температури теплоносія обрано термоперетворювач опору Rosemount 0065 виробництва Emerson у комплекті з вимірювальним перетворювачем Rosemount 3144P (рис. 5.1).

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 5.1 - Термоперетворювач опору Rosemount 0065 у комплекті з вимірювальним перетворювачем Rosemount 3144P

Переваги вибраного датчика:

- висока точність вимірювання;
- стійкість до високих температур;
- цифровий протокол HART;
- можливість дистанційного налаштування;
- висока завадостійкість.

Основні технічні характеристики:

- діапазон вимірювання: від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- похибка: $\pm 0,1\%$;
- вихідний сигнал: 4–20 мА/HART;
- ступінь захисту: IP66/IP67.

Вибір датчиків тиску та розрідження

Для контролю тиску паливного газу та розрідження в топковому просторі використовується диференційний перетворювач тиску Rosemount 3051 (рис. 5.2).



Рисунок 5.2 - Диференційний перетворювач тиску Rosemount 3051

Переваги:

- висока стабільність вимірювання;
- можливість роботи в агресивних середовищах;
- підтримка цифрових протоколів зв'язку;
- висока надійність.

Основні характеристики:

- діапазон вимірювання: 0–10 кПа;
- вихідний сигнал: 4–20 мА/HART;
- похибка: $\pm 0,04$ %.

Вибір витратомірів

Для вимірювання витрати паливного газу та повітря використовується масовий витратомір Micro Motion Elite виробництва Emerson (рис. 5.3).

Переваги:

- висока точність вимірювання;
- пряме вимірювання масової витрати;
- незалежність від зміни температури та тиску;
- цифровий інтерфейс зв'язку.



Рисунок 5.3 - Масовий витратомір Micro Motion Elite

Основні характеристики:

- похибка: $\pm 0,1\%$;
- вихідний сигнал: 4–20 мА, HART, Modbus;
- робочий тиск: до 10 МПа.

Вибір виконавчого механізму

Для регулювання витрати паливного газу обрано регулюючий клапан Fisher EZ виробництва Emerson з електропневматичним позиціонером Fisher FIELDVUE DVC6200 (рис. 5.4).



Рисунок 5.4 - Електропневматичний позиціонер Fisher FIELDVUE DVC6200

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Переваги:

- висока точність позиціонування;
- швидкодія;
- можливість цифрової діагностики;
- підтримка HART-протоколу.

Основні характеристики:

- умовний діаметр: DN50;
- робочий тиск: до 4 МПа;
- сигнал керування: 4–20 мА;
- час спрацювання: не більше 2 с.

Вибір програмованого логічного контролера

Для реалізації алгоритмів автоматичного керування та обробки сигналів контрольно-вимірювальних приладів обрано програмований логічний контролер Modicon M340 компанії Schneider Electric (рис. 5.5).



Рисунок 5.5 - Програмований логічний контролер Modicon M340

Переваги контролера:

- висока надійність;
- підтримка промислових мереж Ethernet та Modbus;
- можливість реалізації складних алгоритмів керування;
- модульна структура;
- підтримка SCADA-систем.

Основні характеристики:

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

- кількість аналогових входів/виходів визначається конфігурацією модулів;
- підтримка Modbus TCP/IP;
- час виконання логічних операцій — до 0,1 мкс;
- резервування живлення та зв'язку.

Вибір операторської станції та SCADA-системи

Для візуалізації технологічного процесу та диспетчерського керування доцільно використати SCADA-систему EcoStruxure Operator Terminal Expert або AVEVA System Platform.

SCADA-система забезпечує:

- відображення параметрів технологічного процесу;
- архівування даних;
- аварійну сигналізацію;
- побудову трендів;
- дистанційне керування обладнанням.

Узагальнена таблиця технічних засобів автоматизації

Таблиця 5.1 – Вибір технічних засобів автоматизації

Найменування	Тип / модель	Виробник	Призначення
Датчик температури	Rosemount 0065 + 3144P	Emerson	Вимірювання температури теплоносія
Датчик тиску	Rosemount 3051	Emerson	Контроль тиску та розрідження
Витратомір	Micro Motion Elite	Emerson	Вимірювання витрати паливного газу
Регулюючий клапан	Fisher EZ	Emerson	Регулювання витрати паливного газу
Позиціонер	FIELDVUE DVC6200	Emerson	Керування клапаном
Програмований контролер	Modicon M340	Schneider Electric	Реалізація алгоритмів керування
SCADA-система	EcoStruxure / AVEVA	Schneider Electric	Візуалізація та диспетчеризація

Таким чином, обрані технічні засоби автоматизації забезпечують необхідну точність вимірювання та регулювання технологічних параметрів, підтримують сучасні цифрові протоколи зв'язку та дозволяють реалізувати ефективну автоматизовану систему керування процесом нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1.

5.2 Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації трубчастої печі ЦС-1 (рис. 5.6) розробляється з метою забезпечення автоматичного контролю, регулювання, сигналізації та захисту процесу нагрівання теплоносія Т-1. Основним завданням схеми є підтримання температури теплоносія на виході з печі на заданому рівні 250 °С при зміні витрати теплоносія, температури на вході та параметрів паливного газу(рис. 5.6).

Функціональна схема автоматизації передбачає контроль таких основних технологічних параметрів:

- температури теплоносія на вході в піч;
- температури теплоносія на виході з печі;
- витрати паливного газу;
- витрати повітря на горіння;
- тиску паливного газу перед пальниками;
- розрідження в топковому просторі;
- температури димових газів;
- наявності полум'я в пальникових пристроях.

Основним контуром керування є контур регулювання температури теплоносія на виході з печі. Температура вимірюється датчиком температури ТЕ-101, сигнал від якого надходить на вимірювальний перетворювач ТТ-101. Далі уніфікований сигнал 4–20 мА передається на програмований логічний контролер PLC. У контролері сигнал порівнюється із заданим значенням температури. У разі

відхилення температури від заданого значення контролер формує керуючий сигнал на регулюючий клапан паливного газу через виконавчий механізм TV-101.

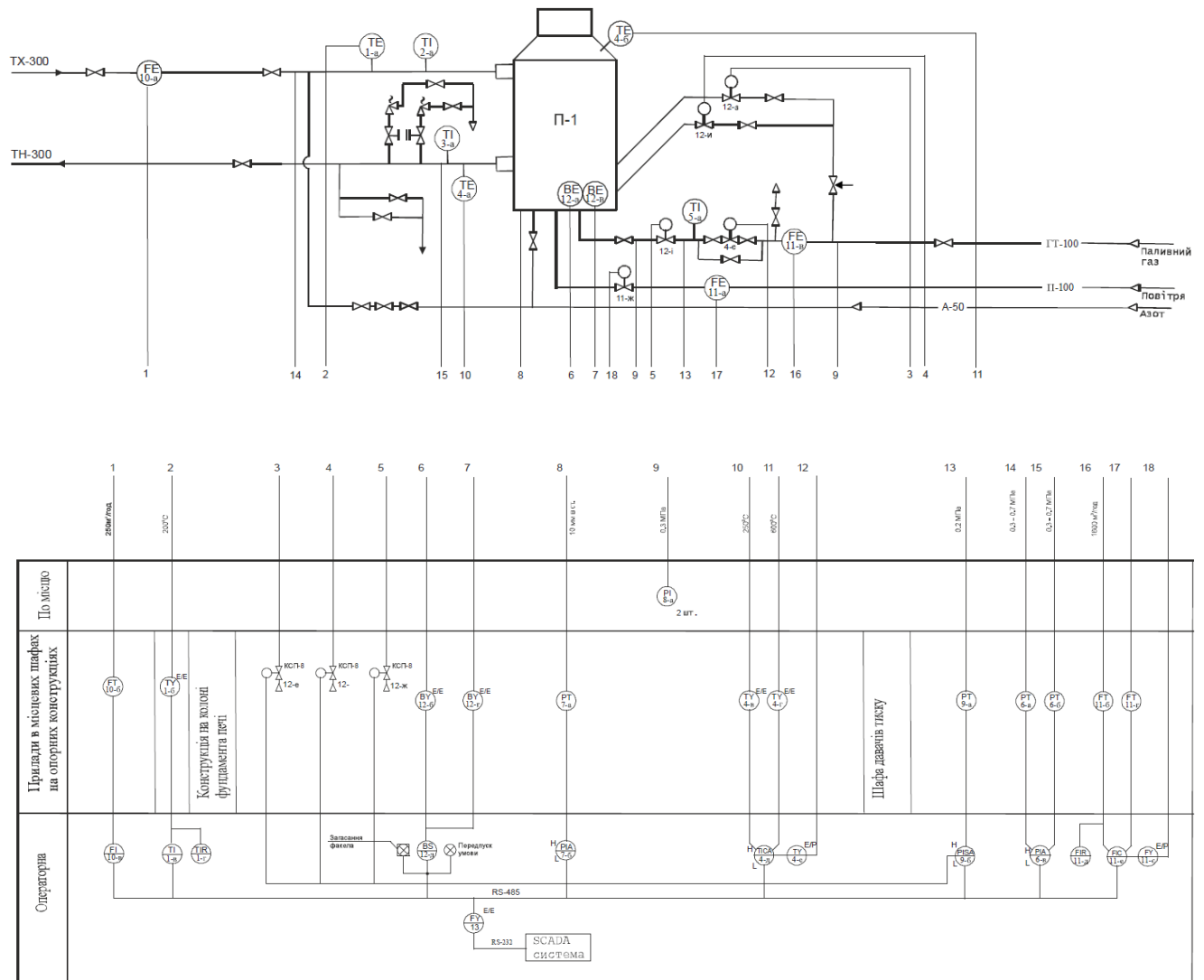


Рисунок 5.6 – Функціональна схема автоматизації трубчастої печі

Для підвищення якості регулювання передбачено каскадну структуру керування. Зовнішній контур регулює температуру теплоносія, а внутрішній контур стабілізує витрату паливного газу. Витрата газу вимірюється витратоміром FE-102 з перетворювачем FT-102. Сигнал надходить до контролера, де порівнюється із завданням, сформованим регулятором температури. Керуючий сигнал подається на регулюючий клапан FV-102, який змінює витрату паливного газу до пальників.

Для забезпечення повного згоряння палива передбачено контроль витрати повітря на горіння. Витрата повітря вимірюється датчиком FE-103 та перетворювачем FT-103. Система автоматизації підтримує оптимальне співвідношення «паливо–повітря», що дозволяє зменшити втрати теплоти з димовими газами, підвищити ККД печі та знизити кількість шкідливих викидів.

Розрідження в топковому просторі контролюється датчиком тиску PE-104 та перетворювачем PT-104. Підтримання необхідного розрідження забезпечується зміною продуктивності димососа або положенням шибера в димовому тракті. Контур регулювання розрідження запобігає виходу продуктів згоряння через нещільності печі та забезпечує стабільність процесу горіння.

Температура димових газів контролюється датчиком TE-105 з перетворювачем TT-105. Цей параметр використовується для оцінювання ефективності тепловикористання печі. Надмірне підвищення температури димових газів свідчить про збільшення теплових втрат і може бути ознакою порушення режиму роботи печі.

Тиск паливного газу перед пальниками контролюється датчиком PE-106 та перетворювачем PT-106. При зниженні або підвищенні тиску за допустимі межі система формує попереджувальну або аварійну сигналізацію. У випадку аварійного відхилення параметра подача паливного газу автоматично припиняється за допомогою відсічного клапана SV-106.

Для безпечної експлуатації печі передбачено систему контролю полум'я. Датчик полум'я BE-107 контролює наявність горіння в пальникових пристроях. У разі згасання полум'я система автоматично закриває відсічний клапан паливного газу та формує аварійний сигнал на операторську станцію.

Усі сигнали від первинних перетворювачів надходять до програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M340. Контролер виконує функції збору та обробки інформації, реалізує алгоритми регулювання, формує сигнали керування виконавчими механізмами, а також забезпечує аварійний захист і блокування. Для візуалізації процесу використовується операторська

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

станція SCADA, на якій відображаються поточні значення температури, витрати, тиску, розрідження, стан клапанів і аварійні повідомлення.

Функціональна схема автоматизації передбачає такі основні функції:

- автоматичне регулювання температури теплоносія на виході з печі;
- каскадне регулювання температури через стабілізацію витрати паливного газу;
- контроль і регулювання співвідношення «паливо–повітря»;
- контроль розрідження в топковому просторі;
- контроль температури димових газів;
- контроль тиску паливного газу;
- сигналізацію граничних значень технологічних параметрів;
- аварійне відключення подачі палива при небезпечних режимах;
- передачу інформації на операторську станцію.

Таблиця 5.2 – Перелік основних контурів контролю та регулювання

Позначення контуру	Контрольований параметр	Засіб вимірювання	Вид дії
TIC-101	Температура теплоносія на виході з печі	TE-101, TT-101	Контроль, регулювання, сигналізація
FIC-102	Витрата паливного газу	FE-102, FT-102	Контроль, регулювання
FIC-103	Витрата повітря на горіння	FE-103, FT-103	Контроль, регулювання співвідношення
PIC-104	Розрідження в топковому просторі	PE-104, PT-104	Контроль, регулювання, сигналізація
TI-105	Температура димових газів	TE-105, TT-105	Контроль, сигналізація
PI-106	Тиск паливного газу	PE-106, PT-106	Контроль, сигналізація, захист
BS-107	Наявність полум'я	BE-107	Контроль, аварійний захист

Таблиця 5.3 – Умовні позначення приладів функціональної схеми

Позначення	Найменування
TE	Первинний перетворювач температури
TT	Вимірювальний перетворювач температури
TIC	Регулятор температури з індикацією
FE	Первинний перетворювач витрати
FT	Вимірювальний перетворювач витрати
FIC	Регулятор витрати з індикацією
PE	Первинний перетворювач тиску
PT	Вимірювальний перетворювач тиску
PIC	Регулятор тиску з індикацією
BE	Датчик полум'я
FV	Регулюючий клапан витрати
TV	Регулюючий орган температурного контуру
SV	Відсічний клапан
PLC	Програмований логічний контролер
SCADA	Система диспетчерського керування та збору даних

Таким чином, розроблена функціональна схема автоматизації забезпечує комплексний контроль і регулювання основних параметрів трубчастої печі ЦС-1. Її реалізація дозволяє підвищити точність підтримання температури теплоносія, зменшити витрати паливного газу, забезпечити стабільність процесу горіння та підвищити рівень промислової безпеки установки.

Висновки до розділу

У п'ятому розділі виконано розробку проектної складової системи автоматичного керування процесом нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1. Проведено вибір сучасних технічних засобів автоматизації, які забезпечують надійне функціонування системи, високу точність регулювання та відповідність вимогам промислової безпеки.

Для реалізації системи автоматизації обрано обладнання компаній Emerson та Schneider Electric, яке широко використовується в сучасних промислових

системах керування. Виконано вибір датчиків температури, тиску, витрати, регулюючих клапанів, виконавчих механізмів, програмованого логічного контролера та SCADA-системи. Обрані технічні засоби характеризуються високою точністю вимірювання, надійністю роботи, підтримкою цифрових протоколів зв'язку та можливістю інтеграції в автоматизовану систему керування технологічним процесом.

Розроблено функціональну схему автоматизації трубчастої печі ЦС-1, яка забезпечує автоматичний контроль, регулювання, сигналізацію та аварійний захист технологічного процесу. У схемі реалізовано каскадне регулювання температури теплоносія через стабілізацію витрати паливного газу, контроль співвідношення «паливо–повітря», контроль розрідження в топковому просторі та систему захисту при аварійних режимах роботи.

Передбачено використання програмованого логічного контролера Schneider Electric Modicon M340 для реалізації алгоритмів керування та системи SCADA для диспетчерського контролю, архівування даних і візуалізації параметрів технологічного процесу.

Розроблена функціональна схема автоматизації дозволяє забезпечити стабільне підтримання температури теплоносія, знизити витрати паливного газу, підвищити енергоефективність процесу нагрівання та забезпечити безпечну експлуатацію трубчастої печі ЦС-1. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації автоматизованих систем керування теплотехнічними об'єктами на промислових підприємствах.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання автоматизації процесу нагрівання теплоносія в трубчастій печі ЦС-1 установки осушки природного газу. Проведений аналіз технологічного процесу показав, що стабільність температурного режиму теплоносія є одним із основних факторів ефективної та безпечної роботи установки.

У роботі досліджено конструктивні та технологічні особливості трубчастої печі ЦС-1, визначено основні параметри процесу, що підлягають контролю та регулюванню. Встановлено, що основним регульованим параметром є температура теплоносія на виході з печі, а основними збуреннями — зміна витрати теплоносія, параметрів паливного газу та умов процесу горіння.

На основі рівнянь теплового балансу побудовано математичну модель трубчастої печі як об'єкта автоматичного керування. Отримано передавальні функції основних каналів керування та збурення, що дозволило виконати синтез систем автоматичного регулювання та провести аналіз їхніх динамічних характеристик.

У роботі розроблено одноконтурну та каскадну системи автоматичного керування процесом нагрівання теплоносія. Для систем керування обґрунтовано використання ПІ-регуляторів та визначено їх параметри налаштування. Проведений аналіз перехідних процесів, частотних характеристик та показників стійкості показав, що каскадна система автоматичного керування має кращі динамічні характеристики порівняно з одноконтурною системою. Зокрема, каскадна система забезпечує менше перерегулювання, менший час встановлення та вищі запаси стійкості.

У процесі виконання роботи здійснено вибір сучасних технічних засобів автоматизації на базі обладнання компаній Emerson та Schneider Electric. Обрано датчики температури, тиску, витрати, регулюючі клапани, програмований логічний контролер та SCADA-систему, які забезпечують необхідну точність

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірювання, надійність роботи та можливість інтеграції в автоматизовану систему керування технологічним процесом.

Розроблено функціональну схему автоматизації трубчастої печі ЦС-1, яка реалізує автоматичний контроль, каскадне регулювання температури теплоносія, контроль співвідношення «паливо–повітря», контроль розрідження в топковому просторі, аварійну сигналізацію та захист обладнання. Запропонована система автоматизації дозволяє забезпечити стабільний температурний режим, зменшити витрати паливного газу та підвищити енергоефективність технологічного процесу.

Результати роботи підтверджують доцільність застосування сучасних методів автоматичного керування та мікропроцесорних засобів автоматизації для трубчастих печей теплотехнічних установок. Реалізація запропонованої системи автоматизації дозволить підвищити надійність роботи обладнання, покращити якість керування технологічним процесом та забезпечити безпечну експлуатацію трубчастої печі ЦС-1.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Åström K.J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. – ISA, 1995.
2. Clarke D.W., Mohtadi C., Tuffs P.S. Generalized Predictive Control. // Automatica. – 1987. – Vol. 23, № 2. – P. 137–148.
3. Fuchs A., Lewis D. Furnace Control and Optimization in Petroleum Refineries. – Houston: Gulf Publishing, 2000.
4. Bequette B.W. Process Control: Modeling, Design and Simulation. – New Jersey: Prentice Hall, 2003.
5. Gao F., Zhang R. Industrial Process Advanced Control. – London: Springer, 2012.
6. Hu X., Zou Q., Zou H., Tao J., Gao F. Design and Application of Fractional Order Predictive Functional Control for Industrial Heating Furnace. // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 66674–66684.
7. Xu W., Zhang J., Zhang R. Application of Multi-model Switching Predictive Functional Control on the Temperature System of an Electric Heating Furnace. // ISA Transactions. – 2017. – Vol. 68. – P. 287–297.
8. Hu Y., Tan C., Broughton J., Roach P., Varga L. Nonlinear Dynamic Simulation and Control of Large-Scale Reheating Furnace Operations Using a Zone Method Based Model. // Applied Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 136. – P. 201–214.
9. Skopec P. Predictive Control of a Reheating Furnace Using a Detailed Model. // Applied Thermal Engineering. – 2025.

					БР.АКП-76.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		