

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ

Група АКП-23-1К

**Олег Діян**

**2025**

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

Діян Олег Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.51

(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

### АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПАРИ КОТЛОАГРЕГАТОМ

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

#### Нормоконтроль

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

О.В. Кучмистенко

(ініціали та прізвище)

#### Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-1К

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

О.А. Діян

(ініціали та прізвище)

#### Рецензент

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я. Чигур

(ініціали та прізвище)

#### Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.Я. Чигур

(ініціали та прізвище)

#### Допущено до захисту

#### Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

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

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри АКІТ**

«   »                      2025 року

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

Діян Олег Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація процесу виробництва пари котлоагрегатом

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

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

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

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 р.

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

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

Всуп. 1. Комплексний аналіз котельного агрегату ТП-100 як об'єкта керування. 2. Аналіз сучасних системи керування котлоагрегатами. 3. Дослідження динамічних властивостей котлоагрегату як об'єкта керування. 4. Синтез та аналіз системи автоматичного керування котлоагрегатом ТП-100.

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

Лист 1 – Функціональна схема автоматизації - БР.АКП-14.00.00.000 01. Лист - Структурна схема взаємозв'язків - БР.АКП-14.00.00.000 02. Лист 3 – Перехідні характеристики - БР.АКП-14.00.00.000 03. Лист 4 – Дослідження динаміки керованого об'єкту - БР.АКП-14.00.00.000 04. Лист 5 - Синтез і дослідження одноконтурної АСК - БР.АКП-14.00.00.000 05. Лист 6 - Синтез і дослідження каскадної АСК - БР.АКП-14.00.00.000 06 .

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Комплексний аналіз котельного агрегату ТП-100 як об'єкта керування	13.05.2025	
2.	Аналіз сучасних системи керування котлоагрегатами	17.05.2025	
3.	Дослідження динамічних властивостей котлоагрегату як об'єкта керування	25.05.2025	
4.	Синтез та аналіз системи автоматичного керування котлоагрегатом ТП-100	08.06.2025	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

О.А. Діян \_\_\_\_\_  
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 61 сторінку друкованого тексту, 20 рисунків, 7 таблиць, 5 посилань на джерела, 2 додатки.

Тема: «Автоматизація процесу виробництва пари котлоагрегатом».

Об'єкт дослідження: процес виробництва пари котлоагрегатом.

Мета проекту: розробити систему автоматизації котлоагрегатом ТП-100.

Методи дослідження охоплювали комплексний підхід, що поєднував теоретичні та практичні інструменти. Положення теорії автоматичного керування були основоположними для вирішення ключових завдань, а саме: ідентифікації передавальних функцій керованого об'єкта та обчислення оптимальних налаштувань регуляторів.

Паралельно, методологія математичного моделювання забезпечила теоретичний фундамент для розробки деталізованої моделі системи керування. Для глибинного аналізу динамічних характеристик та оцінки поведінки розробленої моделі, особливо в різних експлуатаційних режимах, активно використовувалися методи імітаційного моделювання. Ці симуляції проводилися у спеціалізованому середовищі MATLAB, що дозволило отримати вичерпні дані про функціонування системи до її фізичної реалізації.

Результати бакалаврської роботи: Існуюча система автоматизації котла, як об'єкта керування, виявилася недосконалою, що призводить до значних експлуатаційних труднощів. Це свідчить про необхідність модернізації та впровадження

З огляду на виявлені недоліки, було запропоновано розробити та впровадити нову систему автоматизації, що базується на класичних регуляторах. Цей підхід забезпечує надійність, стабільність та легкість налаштування, що є критично важливим для промислових об'єктів.

Ключові слова: котел, керування, пара, модель, ефективність.

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis contains: 61 pages of printed text, 20 figures, 7 tables, 5 references to sources, 2 appendices.

Topic: "Automation of the process of steam production by a boiler unit".

Object of research: the process of steam production by a boiler unit.

Project goal: to develop an automation system for a tp-100 boiler unit

The research methods covered a comprehensive approach that combined theoretical and practical tools. The provisions of the theory of automatic control were fundamental for solving key tasks, namely: identifying the transfer functions of the controlled object and calculating the optimal settings of the regulators.

In parallel, the methodology of mathematical modeling provided a theoretical foundation for developing a detailed model of the control system. For an in-depth analysis of the dynamic characteristics and assessing the behavior of the developed model, especially in different operating modes, simulation modeling methods were actively used. These simulations were conducted in a specialized matlab environment, which allowed obtaining comprehensive data on the functioning of the system before its physical implementation.

Results of the bachelor's thesis: the existing boiler automation system, as a control object, turned out to be imperfect, which leads to significant operational difficulties. This indicates the need for modernization and implementation

Given the identified shortcomings, it was proposed to develop and implement a new automation system based on classical regulators. This approach provides reliability, stability and ease of adjustment, which is critically important for industrial facilities.

Keywords: boiler, control, steam, model, efficiency.



3.3 Апаратне та програмне забезпечення для проведення експериментальних досліджень та моделювання динаміки.....	37
3.4 Комплексне дослідження динаміки об'єкта.....	39
Висновки до розділу .....	44
<b>4 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КОТЛОАГРЕГАТОМ ТП-100 .....</b>	<b>45</b>
4.1 Синтез одноконтурної АСК.....	45
4.2 Синтез каскадної АСК.....	47
4.3 Комплексне дослідження на стійкість розроблених одноконтурної та каскадної АСК .....	51
4.4 Оцінка якості процесів керування за перехідними характеристиками та інтегральними показниками.....	55
Висновки до розділу .....	58
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>59</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....</b>	<b>61</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	

## ВСТУП

Метою бакалаврської роботи є розробка системи автоматизації котлоагрегатом ТП-100.

Автоматизація технологічних процесів на теплових електростанціях, зокрема керування потужними котельними агрегатами, є ключовим фактором підвищення їхньої експлуатаційної ефективності, надійності та відповідності сучасним екологічним нормам. Метою даної роботи є комплексний аналіз котельного агрегату ТП-100 як об'єкта керування, а також розробка та обґрунтування вдосконаленої системи автоматичного керування (АСК) на основі сучасних науково-технічних досягнень. Актуальність роботи зумовлена необхідністю модернізації існуючих енергоблоків, значна частина яких експлуатується тривалий час, та впровадженням передових технологій для оптимізації режимів роботи, зниження питомих витрат палива та мінімізації шкідливих викидів в атмосферу.

Експлуатація потужних пилувугільних котлоагрегатів, до яких належить ТП-100, пов'язана з низкою складних технічних завдань. До них належать забезпечення стабільного та ефективного процесу горіння низькосортного палива, точне підтримання параметрів перегрітої пари (температури та тиску) в умовах змінних навантажень, оптимізація співвідношення "паливо-повітря" для мінімізації хімічного та механічного недопалу, а також контроль та зниження викидів оксидів сірки (SO<sub>x</sub>), оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) та твердих частинок. Значна інерційність котлоагрегату як об'єкта керування, наявність транспортних запізнь та взаємний вплив технологічних параметрів ускладнюють синтез ефективних систем автоматичного регулювання. Стан багатьох українських ТЕС, де експлуатуються подібні котли, свідчить про нагальну потребу в модернізації, спрямованій на підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) та зменшення негативного впливу на довкілля.

У сучасному світі, де енергоефективність та безпека виробництва є ключовими аспектами, автоматизація котлоагрегатів відіграє критично важливу

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

роль. Котлоагрегати є серцем багатьох промислових процесів та систем теплопостачання, забезпечуючи генерацію пари або гарячої води. Їхня ефективна та надійна робота безпосередньо впливає на економічність, екологічність та безпеку всього підприємства.

Історично управління котлами покладалося на операторів, які вручну контролювали параметри, реагуючи на зміни у навантаженні чи умовах. Однак, зростаючі вимоги до точності підтримки режимів, мінімізації споживання палива, зниження викидів та підвищення рівня безпеки зробили ручне керування недостатньо ефективним і ризикованим. Саме тому впровадження систем автоматизації стало невід'ємною частиною сучасного котлобудування та експлуатації.

Метою бакалаврської роботи є детальний розгляд принципів та переваг автоматизації котлоагрегатів. У першому розділі проведено детальний аналіз котельного агрегату ТП-100, його конструктивних особливостей, характеристик сировини та палива, а також теплового балансу. Цей розділ доповнено інформацією щодо сучасних підходів до експлуатації аналогічного обладнання та технологій підготовки палива і води. Другий розділ присвячено аналізу існуючих та сучасних систем керування котлоагрегатами, включаючи огляд традиційних ПІД-регуляторів, програмованих логічних контролерів (ПЛК), SCADA-систем, розподілених систем керування (DCS) та новітніх інтелектуальних підходів на базі штучного інтелекту та машинного навчання. Також розглянуто методи регулювання температури перегрітої пари та технічну реалізацію АСК з урахуванням актуальних стандартів. Третій розділ фокусується на дослідженні динамічних властивостей котлоагрегату, розробці його математичної моделі на основі експериментальних даних та аналітичних методів. Четвертий розділ містить результати синтезу одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування, аналіз їх стійкості за допомогою класичних критеріїв та оцінку якості регулювання. Кожен розділ доповнено висновками, що базуються на аналізі сучасних наукових публікацій та технічної документації, з метою представлення комплексного та актуального дослідження.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ ТП-100 ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

## 1.1 Призначення, конструктивні особливості та режими функціонування котельного агрегату ТП-100

Котельний агрегат ТП-100, що розглядається, є пиловугільним паровим котлом, призначеним для виробництва перегрітої пари високих параметрів, яка використовується для приводу турбогенераторів на теплових електростанціях. Його номінальна паропродуктивність становить 178 кг/с (640 т/год), робочий тиск у парозбірній камері первинного пароперегрівача – 3.7 МПа, а температура первинної пари – 545°C. Котел має однобарабанну конструкцію з природною циркуляцією та рідинним шлаковидаленням, виконаний за Т-подібною компоновкою з двостороннім відведенням димових газів. Основними конструктивними елементами є топкова камера, конвективні та радіаційні поверхні нагріву (екрани, пароперегрівачі, водяний економайзер, повітропідігрівач), тягодуттєві пристрої для подачі повітря в топку та видалення продуктів згоряння, а також котельно-допоміжне обладнання.

Функціонування енергетичних котлоагрегатів такої потужності характеризується виробництвом значної кількості перегрітої пари, часто з температурою до 600°C та тиском вище критичного. Ключовою особливістю котлоагрегату як об'єкта керування є значне транспортне запізнення: зміна витрати палива призводить до зміни температури пари на виході через суттєвий проміжок часу, що значно ускладнює процеси автоматизації та вимагає застосування складних алгоритмів регулювання. Процес пароутворення відбувається при постійному тиску і включає три етапи: нагрівання води до температури насичення, власне пароутворення та перегрів пари до заданої температури (наприклад, 545°C для ТП-100).

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

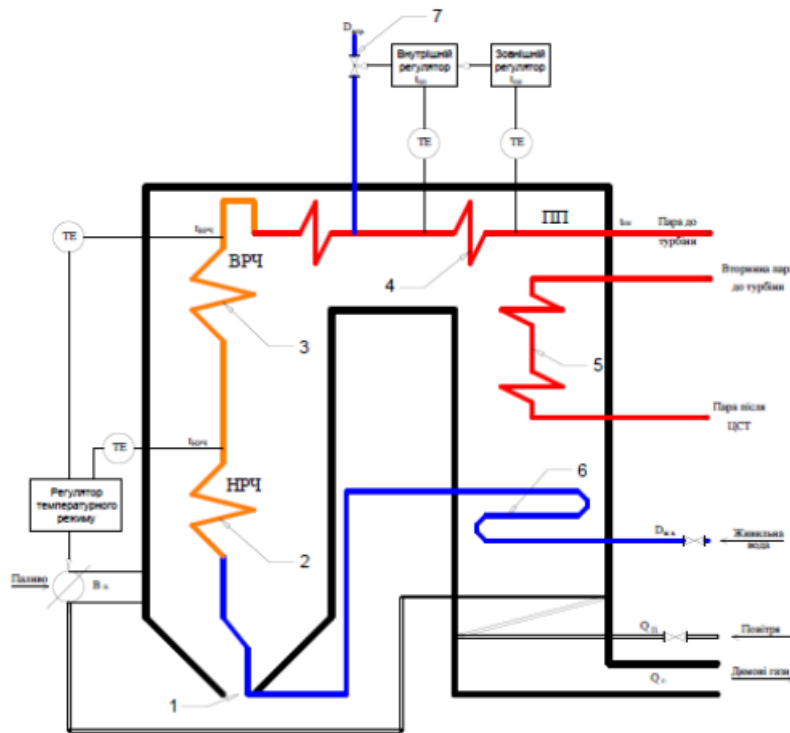


Рисунок 1.1 – Схема технологічна

Котельний агрегат ТП-100, як представник технологій, розроблених кілька десятиліть тому, має характеристики, що визначають його експлуатаційні можливості та обмеження. Його значна поширеність на українських ТЕС, зокрема на Бурштинській ТЕС, свідчить про те, що значна частка генеруючих потужностей країни базується на обладнанні, яке може мати обмежену гнучкість та ефективність порівняно з більш сучасними установками. Наприклад, котли з циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ) пропонують вищу паливну гнучкість, дозволяючи ефективно спалювати низькосортне вугілля, відходи вуглезбагачення та біомасу, при цьому забезпечуючи нижчий рівень викидів  $\text{NO}_x$  та  $\text{SO}_x$  завдяки нижчим температурам горіння та можливості введення сорбентів безпосередньо в топку. Значне запізнення, властиве котлам типу ТП-100, ускладнює їхню участь у швидкому регулюванні частоти та потужності в енергосистемі, що стає все більш актуальним з ростом частки відновлюваних джерел енергії. Цей контекст створює об'єктивні передумови для розробки та впровадження програм модернізації існуючих пилувугільних котлів, спрямованих на підвищення їх ККД, зниження шкідливих викидів та покращення маневрових характеристик, або ж для

поступової заміни їх на більш сучасні та екологічно чисті технології.

## 1.2 Характеристика сировини, палива та продуктів згоряння

Якість сировини та палива, а також склад продуктів згоряння, є визначальними факторами для надійної, економічної та екологічно прийнятної роботи котельного агрегату.

Живильна вода, що використовується для поповнення випареної води в котлоагрегатах, повинна відповідати жорстким вимогам щодо чистоти для запобігання утворенню накипу та відкладень на внутрішніх поверхнях труб, а також для мінімізації корозійних процесів. Найкращою вважається вода, отримана при конденсації пари, через низький вміст домішок. Сира вода перед подачею в котел проходить багатоступеневу попередню обробку. Якість живильної води характеризується такими показниками, як сухий залишок, загальний солевміст, твердість, лужність, вміст кремнієвої кислоти, концентрація іонів  $H^+$  (рН), та вміст корозійно-активних газів (кисень, вуглекислота). Норми якості живильної води для котла ТП-100 представлені в таблиці 1.1.

Сучасні методи водопідготовки для котлів високого тиску включають комплекс технологій, що забезпечують глибоке очищення води. До них належать:

Механічна очистка: видалення зважених частинок за допомогою фільтрів.

- Знезалізнення та деманганація: видалення сполук заліза та марганцю.
- Пом'якшення: видалення іонів кальцію та магнію, що спричиняють твердість, зазвичай методом іонного обміну.
- Демінералізація: глибоке знесолення води, часто із застосуванням зворотного осмосу та/або іонного обміну на  $H^-$  та  $OH^-$  іонітних фільтрах.
- Дегазація: видалення розчинених газів (кисню та вуглекислоти) термічними або хімічними методами (наприклад, введенням гідразину або сульфату натрію для зв'язування кисню).
- Хімічна корекція рН: доведення рН до оптимальних значень для запобігання корозії.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Таблиця 1.1 – Стандарти чистоти живильної води

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА	ОБМЕЖЕННЯ ДОПУСТИМОСТІ
Жорсткість:	
Загальна	Не більше 5.1 мкг-екв на кілограм
Домішки:	
Дисперговані речовини	Повністю відсутні
Сполуки заліза	Не більше 51 мкг/кг
Сполуки міді	Не більше 11 мкг/кг
Розчинений кисень	Не більше 21 мкг/кг
Вільна кремнієва кислота	Повністю відсутня
Олії та жири	Макимум 21 мг/кг
Вуглекислий газ	Не більше 0,6 мкг/кг
Кислотність (рН):	
При 24°C	Від 8.6 до 9.6

Стандарти, такі як ДСТУ 2631-94, регламентують вимоги до якості води для парових котлів, і сучасні системи водопідготовки дозволяють досягати показників, що значно перевищують мінімально допустимі, забезпечуючи тривалу та безаварійну роботу обладнання. Наприклад, для котлів високого тиску жорсткість води може обмежуватися значенням до 0.1 мг-екв/л, а вміст розчиненого кисню – менше 0.02 мг/л.

На котлах Бурштинської ТЕС, де встановлені агрегати ТП-100, спалюється вугілля марки "АШ" (антрацитовий штиб). Хімічний склад цього вугілля (% на робочу масу): СР=55.0; ОР=7.7; НР=3.5; StP=3.2; NP=0.9; AP=22.4; WtP=7.4. Нижня теплота згоряння  $Q_{нр}=24369$  кДж/кг.

Спалювання антрацитового штибу пов'язане з певними труднощами:

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- Низький вихід летких речовин ( $V_r \approx 4-5\%$ ): Це ускладнює займання пиловугільного факела та вимагає створення високих температур у зоні горіння, часто із застосуванням підсвічувального палива (мазуту або природного газу).
- Висока твердість та абразивність: Призводить до інтенсивного зносу обладнання систем пилоприготування.
- Можливий високий вміст золи ( $AP=22.4\%$  у даному випадку): Збільшує кількість шлаку та золи, що потребують видалення, та може призводити до шлакування поверхонь нагріву.
- Схильність до механічного та хімічного недопалу: Через складність займання та вигорання коксового залишку.

Для підвищення ефективності спалювання вугілля АШ розглядаються різні технологічні рішення, такі як використання активаторів горіння (наприклад, REDUXCO), додавання до палива легкої золи для покращення умов займання та стабілізації факела, а також застосування більш досконалих пальникових пристроїв та технологій спалювання, наприклад, у циркулюючому киплячому шарі, де низькосортні палива можуть спалюватися ефективніше. Проблеми зі спалюванням АШ на котлах типу ТП-15 (аналогічних за принципом пиловугільного спалювання) включають недостатню висоту топки, недостатню температуру первинного повітря (менше  $340^\circ\text{C}$ ) та застарілу конструкцію пальників.

Пара, що виробляється котлом, повинна бути чистою для запобігання відкладень на внутрішніх поверхнях труб пароперегрівача та лопатках турбін. Якість пари залежить від її вологості та концентрації забруднюючих речовин, що переходять з котлової води. Норми якості насиченої та перегрітої пари наведені в таблиці 1.2.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 -Критерії якості для насиченої та перегрітої пари

ДОПУСТИМИЙ РІВЕНЬ	ІНДИКАТОР ЯКОСТІ
Максимум 300 мкг/кг	Солевміст (як еквівалент Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
До 20 мкг/кг	Вільна вуглекислота
Нульова присутність	Аміак вільний (не пов'язаний з вуглекислотою)

Продукти згоряння вугілля АШ містять значну кількість золи, а також газоподібні викиди, такі як діоксид сірки (SO<sub>2</sub>, через наявність сірки в паливі StP =3.2%), оксиди азоту (NO<sub>x</sub>, що утворюються з азоту палива та повітря при високих температурах горіння), та діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>). Враховуючи, що Бурштинська ТЕС, яка експлуатує котли ТП-100 на вугіллі АШ, є одним із значних джерел викидів забруднюючих речовин у Європі та не відповідає Директивам ЄС щодо викидів, питання очищення димових газів є надзвичайно актуальним. Це підкреслює нагальну потребу у впровадженні або модернізації систем сіркоочистки (FGD), азотоочистки (DeNO<sub>x</sub>) та пилоловлення на таких енергоблоках. Вартість таких природоохоронних заходів є значною: наприклад, орієнтовні витрати на сіркоочищення можуть становити 192 млн євро на рік, на пилоочищення – 24 млн євро на рік, а на азотоочищення – 56 млн євро на рік для українських ТЕС в рамках Національного плану скорочення викидів.

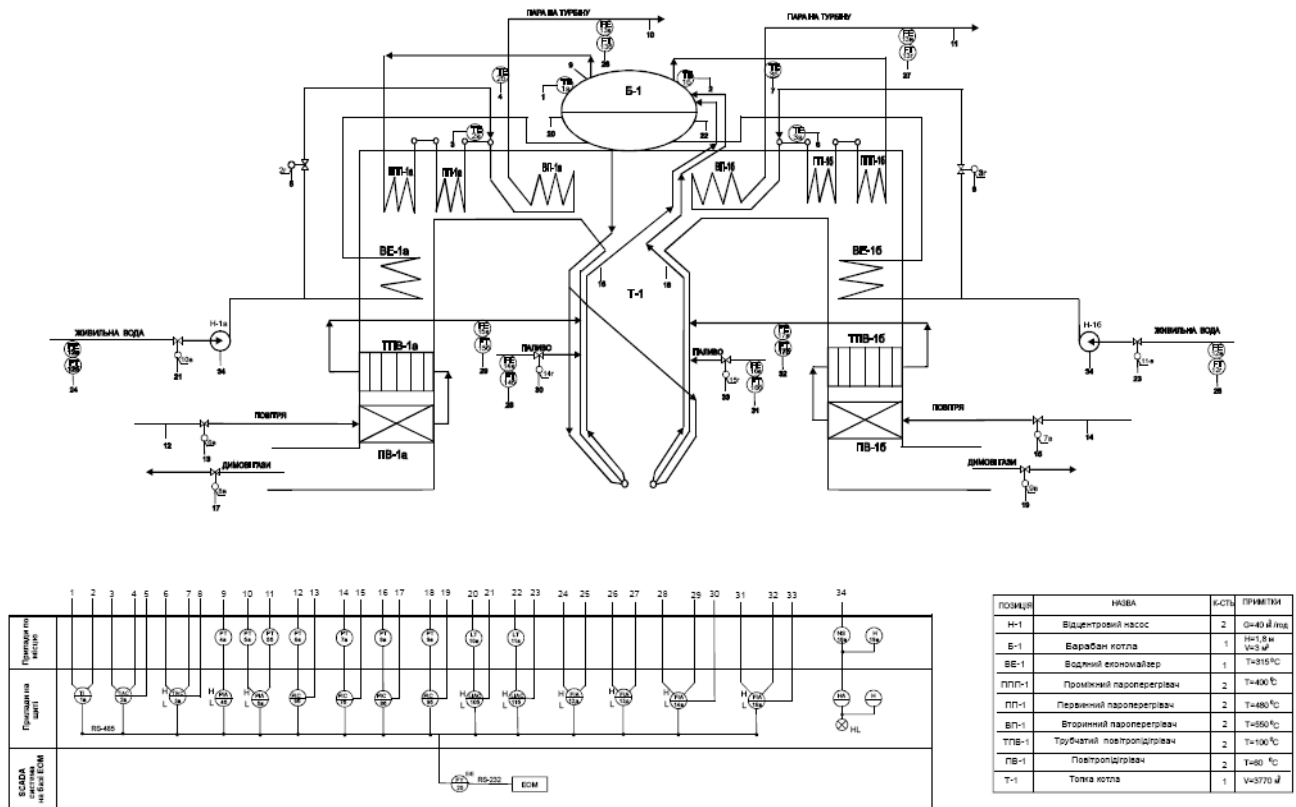
Таким чином, характеристики палива, що використовується на котлах ТП-100, безпосередньо впливають на технологічні аспекти їх експлуатації та визначають серйозні екологічні проблеми. Це вказує на необхідність комплексного підходу, що включає як оптимізацію процесів спалювання самого вугілля АШ (якщо його використання продовжується), так і впровадження високоефективних систем очищення димових газів, або ж перехід на більш чисті види палива та технології їх спалювання, такі як ЦКШ.

### 1.3 Детальний опис та аналіз технологічного устаткування котлоагрегату ТП-100

Котельний агрегат ТП-100 є складною теплотехнічною системою, що

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

включає низку взаємопов'язаних елементів, кожен з яких виконує специфічні функції у процесі виробництва пари (рисунк 1.1).



Рисунк 1.1 – Функціональна схема автоматизації котлоагрегату ТП-100

Топочна камера має призматичну форму, об'ємом 3770 м<sup>3</sup>, і розділена на дві напівтопки двохсвітним екраном. Стіни топки екрановані трубами (60x6)10–3 м зі сталі 20 з кроком 0.064 м. Стеля топки горизонтальна і закрита трубами стельового пароперегрівача. Жорсткість екранів забезпечується спеціальними поясами жорсткості. Конструкція топки розрахована на факельне спалювання пилоподібного палива з рідинним шлаковидаленням, для чого передбачено запалювальний пояс та льотки для видалення рідкого шлаку. Недостатня висота топки та відсутність ефективного перетину потоків можуть бути проблемою при спалюванні низькорекційного вугілля АШ, призводячи до неповного вигорання пилу та збільшення механічного недопалу. Модернізація топкової камери може включати оптимізацію аеродинаміки, встановлення ефективніших систем очищення поверхонь нагріву.

На бокових стінах топочної камери встановлено два ряди по вісім (всього

шістнадцять) комбінованих пило-газових пальників прямого та плоскофакельного типів. Пальник виконаний у вигляді призми з трубою для підводу пилоповітряної суміші. Застаріла конструкція пальників, зокрема відсутність вихрової ежекції димових газів до кореня факела, ускладнює займання пилу АШ. Сучасні пальникові пристрої з оптимізованим змішуванням палива та повітря, ступінчастою подачею повітря та можливістю регулювання форми факела дозволяють покращити умови займання, стабілізувати горіння, знизити утворення NOx та зменшити недопал. Модернізація пальників є одним з пріоритетних напрямків підвищення ефективності котлів ТП-100.

Котел має один зварний барабан внутрішнім діаметром 1.8 м, виготовлений зі сталі 16ГНМ, з товщиною стінки циліндричної частини 0.092 м. Барабан обладнаний водовказівними колонками та 72 циклонами діаметром 0.35 м для сепарації пари. Ефективність сепараційних пристроїв у барабані є критичною для забезпечення якості пари та запобігання виносу вологи і солей у пароперегрівач.

Трубна система (поверхні нагріву) включає екранні труби (фронтний, задній, двохсвітний, бокові екрани) загальною кількістю 938 шт., виготовлені зі сталі 20 (діаметр (60x6)10–3 м). Також система включає водопровідні та паропровідні труби різних діаметрів. Стан трубої системи, відсутність пошкоджень та відкладень на внутрішніх поверхнях є запорукою надійної роботи та ефективного теплообміну.

Пароперегрівач складається з первинного та вторинного пароперегрівачів. Первинний перегріває насичену пару з барабана і включає стельовий, "холодний" конвективний, настінний радіаційний, ширмовий та "гарячий" конвективний ступені. Вторинний пароперегрівач перегріває пару, що надходить з турбіни, і складається з регулюючої частини, "холодної" та "гарячої" конвективних частин. Точне регулювання температури перегрітої пари є ключовим для ККД та надійності турбіни.

Повітропідігрівач розташований у конвективних шахтах і складається з двох ступенів: верхньої трубчатої одноходової та нижньої регенеративної, що обертається. Загальний переріз для проходу газів 36.8 м<sup>2</sup>, повітря – 40 м<sup>2</sup>.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Ефективність повітропідігрівача впливає на температуру холодного повітря, що подається в топку, та на температуру відхідних газів, а отже, на загальний ККД котла.

Водяний економайзер сталевий, некиплячого типу, розміщений у шахтах котла. Складається з чотирьох блоків, кожен з яких містить 62 подвійних горизонтальних змійовики (діаметр (25x3.5)10–3 м, сталь 20). Поверхня нагріву 4150 м<sup>2</sup>. Розрахунковий підігрів води 235-268°С. Економайзер підвищує температуру живильної води за рахунок тепла відхідних димових газів, що також сприяє підвищенню ККД.

#### **1.4 Обґрунтування вибору та діапазони ключових параметрів для моніторингу, контролю та ефективного регулювання котлоагрегатом**

Ефективне та безпечне функціонування котельного агрегату ТП-100 неможливе без точного моніторингу та регулювання низки ключових технологічних параметрів. Вибір цих параметрів ґрунтується на необхідності підтримання матеріального та енергетичного балансів, забезпечення надійності обладнання та досягнення оптимальних показників економічності.

Основні параметри, що потребують безперервного контролю та автоматичного регулювання, включають :

- Рівень води в барабані котла: Цей параметр є критично важливим для забезпечення надійної циркуляції води в екранних трубах. Зниження рівня нижче допустимої межі може призвести до перегріву та руйнування труб, тоді як надмірне підвищення рівня загрожує закидом води в пароперегрівач та турбіну, що може спричинити гідроудари, забруднення лопаток турбіни солями та їх корозію. Діапазон коливань рівня в барабані для ТП-100 становить  $0.7 \pm 0.0075$  м (таблиця 1.3).

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Таблиця 1.3 - Регульовані та контрольовані показники котла

Показник для моніторингу та регулювання	Номер позиції на ФСА (схема автоматизації)	Одиниця виміру	Діапазон значень / Допустиме значення
Температура пари (перегрітої)	3,5	°C	545 ± 10
Рівень рідини в барабані	18,20	м	0,7 ± 0,0075
Вакуум в топці	14,16	кПа	0,6 ± 0,001
Тиск повітряної суміші	10,12	кПа	Від 0,15 до 1,1
Потік палива	26,29	м³/с	160
Тиск пари (перегрітої)	8,9	кПа	140
Температура стінки барабана котла	1,2	°C	300
Потік живильної води	22,23	м³/с	40

- Температура перегрітої пари: Підтримання температури перегрітої пари на заданому рівні (для ТП-100 – 545 ± 10°C, Таблиця 1.3) є необхідним для забезпечення номінального ККД турбіни та запобігання пошкодженню її елементів через температурні напруження або ерозію вологою парою. Відхилення температури від номінального значення є неприпустимим.

- Розрідження в топці котла: Оптимальне розрідження (для ТП-100 – 0.6 ± 0.001 кПа) забезпечує ефективне видалення продуктів згоряння, запобігає вибиванню газів та полум'я з топки в котельне приміщення та мінімізує присоси холодного повітря, які знижують температуру в топці та ККД котла.

- Тиск в топці/газоходах та тиск повітря: Контроль тиску повітря, що подається на горіння (для ТП-100 – 0.15 ± 1.1 кПа), та розрідження в різних

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

точках газового тракту дозволяє оптимізувати процес горіння та роботу тягодуттєвих пристроїв.

- Тиск перегрітої пари: Підтримання стабільного тиску пари (для ТП-100 – 140 кПа, є важливим для стабільної роботи турбіни.

Окрім регульованих параметрів, для господарських розрахунків та забезпечення безпеки контролюються :

- Витрата палива для ТП-100 – 160 м<sup>3</sup>/с.
- Витрата живильної води для ТП-100 – 40 м<sup>3</sup>/с
- Температура димових газів.
- Наявність полум'я в топці.

Хоча перелік основних контрольованих параметрів, наведений в , залишається актуальним, сучасні системи автоматизації значно розширюють можливості їх використання. Інтеграція з системами SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) та DCS (Distributed Control Systems) дозволяє не лише здійснювати моніторинг та стабілізацію параметрів, але й проводити глибокий аналіз даних в реальному часі, діагностику стану обладнання, прогнозування аварійних ситуацій та оптимізацію технологічних процесів в цілому. Сучасні датчики забезпечують вищу точність та надійність вимірювань. Застосування складних алгоритмів керування, таких як адаптивні регулятори, системи на базі нечіткої логіки або нейронних мереж, дозволяє досягти кращої якості регулювання в умовах змінних навантажень та характеристик палива. Таким чином, відбувається перехід від простої стабілізації окремих параметрів до проактивного, інтелектуального управління котлоагрегатом, спрямованого на максимізацію ефективності, мінімізацію витрат та шкідливих викидів. Це особливо важливо для модернізації старіючих агрегатів типу ТП-100, де потенціал для оптимізації може бути значним.

### **Висновки до розділу**

Котельний агрегат ТП-100 є складним багатопараметричним об'єктом керування з вираженою інерційністю та транспортними запізненнями, що

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

характерно для пиловугільних котлів великої потужності. Його ефективна та надійна експлуатація вимагає комплексного підходу, що враховує якість живильної води та палива (вугілля марки "АШ"), конструктивні особливості технологічного устаткування та точне підтримання теплового балансу. Аналіз показав, що використання вугілля АШ пов'язане з певними технологічними та екологічними викликами, зокрема, складністю займання, можливістю недопалу та утворенням значної кількості шкідливих викидів.

Незважаючи на відносно високий розрахунковий ККД (91.7%), існують резерви для його підвищення шляхом мінімізації теплових втрат, особливо з відхідними газами та від механічного недопалу. Це вимагає впровадження сучасних технологій підготовки та спалювання палива, оптимізації режимів роботи та, можливо, модернізації окремих вузлів котлоагрегату. Ключові параметри, такі як рівень води в барабані, температура перегрітої пари та розрідження в топці, потребують точного автоматичного регулювання для забезпечення стабільної роботи та запобігання аварійним ситуаціям. Сучасні тенденції в енергетиці, спрямовані на підвищення гнучкості обладнання та відповідність жорстким екологічним стандартам, ставлять нові вимоги до систем керування котлами типу ТП-100, що робить питання їх модернізації та автоматизації надзвичайно актуальними.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

## 2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОТЛОАГРЕГАТАМИ

### 2.1 Еволюція та порівняльний аналіз систем керування котлоагрегатами

Системи керування котлоагрегатами пройшли значний шлях еволюції, від ручного керування до складних автоматизованих та інтелектуальних комплексів, що забезпечують стабільну роботу, енергозбереження та відповідність екологічним нормам. Ручне керування, характерне для застарілих об'єктів, має низьку точність і значною мірою залежить від людського фактора. Автоматичне керування, що базується на використанні регуляторів, забезпечує стабілізацію ключових параметрів, таких як тиск, температура та витрата пари, в реальному часі.

ПІД-регулятори (Пропорційно-інтегрально-диференціальні) залишаються основою багатьох систем автоматичного регулювання завдяки своїй простоті, надійності та ефективності для широкого класу об'єктів. Вони коригують керуючий вплив на основі поточного відхилення регульованого параметра від заданого значення (пропорційна складова), накопиченої помилки (інтегральна складова, що усуває статичну помилку) та швидкості зміни помилки (диференціальна складова, що покращує динаміку та зменшує перерегулювання). Налаштування ПІД-регуляторів є критичним етапом, для якого існують різні методики, від класичних (наприклад, методи Циглера-Нікольса) до більш сучасних, таких як метод внутрішньої моделі (ІМС-PID) або методики, що використовують багатоцільову оптимізацію для досягнення компромісу між швидкодією та робастністю (серво- та регуляторні задачі). Програмні пакети, наприклад MATLAB, надають інструменти для аналізу та налаштування ПІД-регуляторів. Незважаючи на переваги, класичні ПІД-регулятори можуть бути недостатньо ефективними для об'єктів зі складною нелінійною динамікою, значними запізненнями або змінними параметрами, що характерно для потужних котлоагрегатів.

Програмовані логічні контролери (ПЛК/PLC) стали наступним кроком в

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

автоматизації, дозволяючи реалізовувати складнішу логіку керування, послідовні операції, блокування та захист обладнання. ПЛК забезпечують гнучкість завдяки можливості програмування, високу надійність та простоту інтеграції з датчиками та виконавчими механізмами. Вони широко використовуються в енергетиці для керування окремими вузлами та підсистемами котлоагрегату.

SCADA-системи (Supervisory Control And Data Acquisition) забезпечують верхній рівень керування та моніторингу, дозволяючи операторам візуалізувати технологічний процес, збирати та архівувати дані, отримувати аварійні сповіщення та здійснювати дистанційне керування. SCADA-системи інтегруються з ПЛК та іншими пристроями нижнього рівня, надаючи комплексний огляд роботи об'єкта.

Розподілені системи керування (DCS – Distributed Control Systems) являють собою більш комплексне та інтегроване рішення для автоматизації великих технологічних об'єктів, таких як ТЕС. DCS характеризуються розподіленою архітектурою, де функції керування, збору даних та взаємодії з оператором реалізуються на різних, але взаємопов'язаних рівнях. Типова архітектура DCS включає сервери даних, інженерні станції для конфігурування, операторські станції для моніторингу та керування, а також мережу контролерів, що безпосередньо взаємодіють з польовими пристроями (датчиками та виконавчими механізмами). DCS забезпечують високу надійність завдяки резервуванню ключових компонентів, широкі можливості для реалізації складних алгоритмів керування та інтеграції з системами вищого рівня (MES, ERP). Модернізація існуючих систем керування часто передбачає міграцію на сучасні DCS-платформи, такі як Valmet DNAe, що дозволяє зберегти напрацьовану логіку керування та налаштування, одночасно впроваджуючи нові можливості, включаючи розширену аналітику даних та предиктивне обслуговування.

Інтелектуальні системи керування є сучасним трендом, що передбачає використання алгоритмів штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) для підвищення адаптивності, ефективності та автономності АСК. Такі системи здатні навчатися на історичних даних, прогнозувати розвиток процесів,

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

оптимізувати режими роботи в реальному часі та адаптуватися до змінних умов експлуатації (наприклад, зміна якості палива, навантаження). Застосування нечіткої логіки (Fuzzy Logic Control) дозволяє формалізувати досвід експертів та створювати регулятори, що ефективно працюють в умовах невизначеності та нелінійності. Нейронні мережі можуть використовуватися для моделювання складних залежностей та прогнозування параметрів.

Інтернет речей (IoT) в енергетиці відкриває нові можливості для збору величезних обсягів даних з численних датчиків, встановлених на обладнанні, та передачі їх для аналізу та прийняття рішень. IoT-платформи можуть інтегруватися з цифровими двійниками (Digital Twins) котлоагрегатів, що дозволяє моделювати різні сценарії роботи, оптимізувати процеси та проводити віртуальні випробування перед впровадженням змін на реальному об'єкті.

Зростаюча складність та взаємопов'язаність систем керування висувають на перший план питання кібербезпеки АСУ ТП. Захист від несанкціонованого доступу, вірусних атак та інших кіберзагроз є критично важливим для забезпечення безперебійної та безпечної роботи енергетичних об'єктів.

Перехід від класичних ПД-регуляторів та локальних ПЛК до інтегрованих DCS, а згодом і до інтелектуальних систем на базі AI/ML та IoT, відображає глобальне прагнення до глибшої оптимізації виробничих процесів, підвищення їхньої ефективності, надійності та екологічності. Це не просто заміна апаратних чи програмних компонентів, а фундаментальна зміна підходів до проектування, експлуатації та обслуговування систем керування. Впровадження таких передових технологій вимагає значних інвестицій, високої кваліфікації персоналу та комплексних заходів із забезпечення інформаційної безпеки. Однак потенційні переваги, такі як суттєве зниження експлуатаційних витрат, підвищення ККД, зменшення шкідливих викидів та можливість предиктивного обслуговування обладнання, роблять цей перехід економічно обґрунтованим та технологічно необхідним для сучасної енергетики.

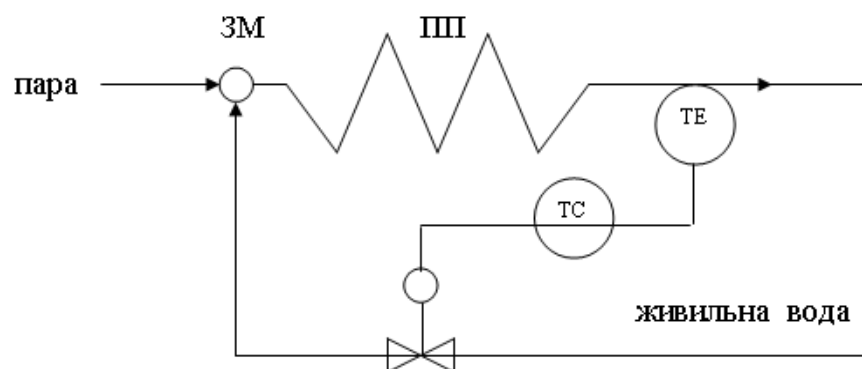
					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

## 2.2 Огляд та порівняння ефективності методів регулювання температури перегрітої пари в сучасних котлоагрегатах

Точне підтримання температури перегрітої пари на заданому значенні є однією з найважливіших задач автоматичного керування котлоагрегатом. Відхилення цього параметра від номінального значення може призвести до зниження економічності турбіни, пошкодження її лопаткового апарату та скорочення терміну служби паропроводів і самого пароперегрівача. Допустимі відхилення температури перегрітої пари від номінального значення для котлоагрегатів з середніми параметрами становлять від +10 до -15°C, а для котлоагрегатів з високими та підвищеними параметрами – від +5 до -10°C.

Існують три принципово різних способи зміни температури перегрітої пари:

1. Регулювання змішуванням: Полягає у впорскуванні в перегріту пару охолоджувача – власного конденсату або живильної води, яка має нижчий тепловміст. Цей метод реалізується за допомогою пароохолоджувачів вприскувального типу (атемператорів). Поверхні нагріву пароперегрівача розраховуються таким чином, щоб за найгірших збурюючих впливів, спрямованих на зниження температури перегріву, температура на виході пароперегрівача була б рівна заданому значенню. Система регулювання забезпечує необхідний вприск для досягнення заданої температури (рисунок 2.1).

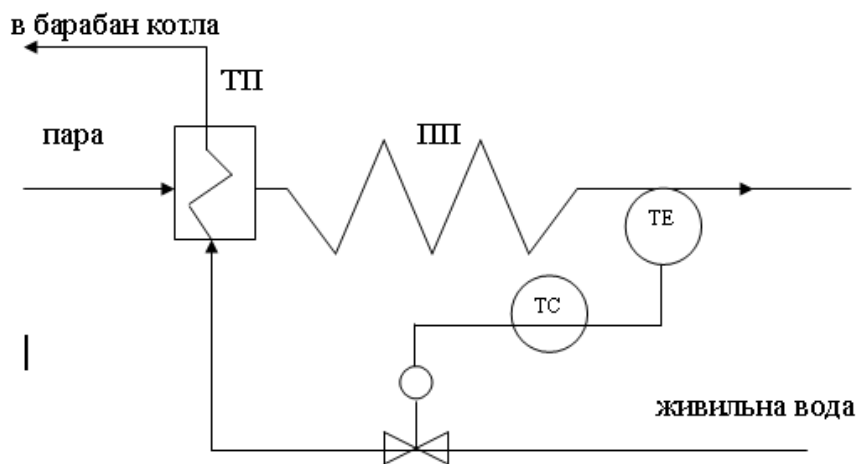


ЗМ- змішувач; ПП- пароперегрівач.

Рисунок 2.1 – Система регулювання температури методом змішування

Переваги: відносна простота конструкції, швидка реакція. Недоліки: можливе зниження загального ККД циклу через введення холоднішої води, вимоги до високої якості вприскуваної води для запобігання відкладень солей у пароперегрівачі та турбіні. Цей метод використовується для регулювання температури гострої пари на багатьох котлах.

2. Регулювання поверхневим охолодженням: Здійснюється у спеціальних поверхневих пароохолоджувачах, де частина тепла перегрітої пари передається живильній воді через стінку теплообмінника. Поверхні нагріву пароперегрівача також розраховуються на забезпечення заданої температури при максимальних збуреннях у бік її зменшення (рисунок 2.2).

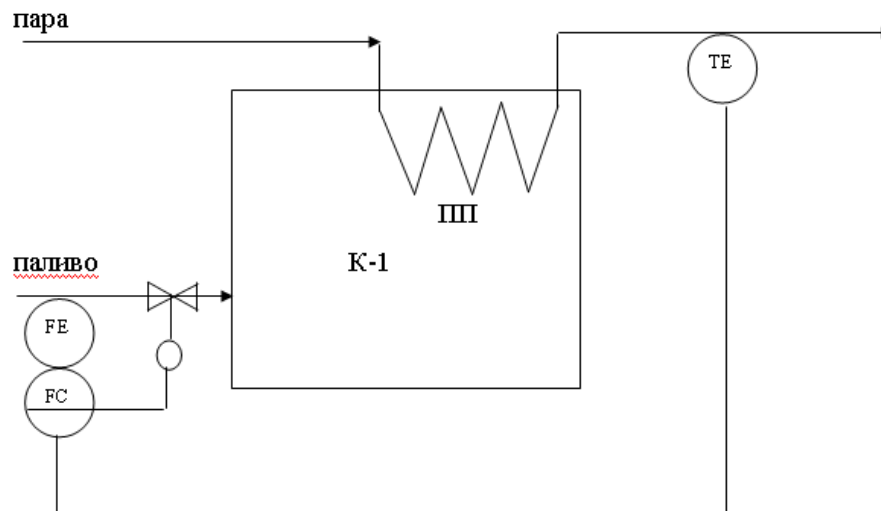


ТП – теплообмінник; ПП- пароперегрівач.

Рисунок 2.2 - Схема регулювання температури методом поверхневого охолодження

Переваги: тепло охолоджувача повертається в цикл, що є більш економічним. Недоліки: більша інерційність порівняно з вприском, складніша конструкція пароохолоджувача.

3. Регулювання впливом на теплове сприйняття робочого середовища: Здійснюється шляхом зміни кількості або температури димових газів, що омивають поверхні нагріву пароперегрівача (рисунок 2.3).



ПП- пароперегрівач; К1- котел

Рисунок 2.3 - Схема регулювання температури методом впливу на теплове сприйняття робочого середовища

Це може бути досягнуто такими способами:

- Байпасування частини димових газів: Частина газів спрямовується повз частину або весь пароперегрівач.
- Рециркуляція димових газів: Частина охолоджених димових газів з хвостової частини котла повертається в топку або перед пароперегрівачем. Це не тільки дозволяє регулювати температуру перегріву, але й може використовуватися для зниження викидів NOx.
- Зміна нахилу пальників: У деяких конструкціях котлів (особливо з тангенціальним розташуванням пальників) зміна кута нахилу пальників дозволяє зміщувати ядро факела по висоті топки, тим самим змінюючи теплосприйняття радіаційних та конвективних поверхонь нагріву, включаючи пароперегрівач. Максимальний кут нахилу може сягати  $\pm 38^\circ$ .
- Зміна співвідношення "паливо-повітря" або перерозподіл подачі палива та повітря по ярусах пальників. Переваги: можливість впливати на теплообмін безпосередньо, потенційно висока економічність. Недоліки: складність реалізації, можлива інерційність, вплив на інші параметри роботи котла (наприклад, на процес горіння).

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Вибір конкретного методу або комбінації методів регулювання температури перегрітої пари залежить від типу котла, його потужності, параметрів пари, виду палива, діапазону зміни навантажень та вимог до точності й швидкодії системи регулювання. У сучасних потужних котлоагрегатах часто застосовують комбіновані системи регулювання. Наприклад, грубе регулювання може здійснюватися рециркуляцією газів або зміною нахилу пальників, а точне доведення температури – вприском невеликої кількості конденсату.

Для підвищення якості регулювання температури пари, особливо в умовах значних збурень та інерційності об'єкта, широко використовуються каскадні (двохімпульсні) системи автоматичного регулювання. В таких системах внутрішній, менш інерційний контур стабілізує температуру пари на проміжній ділянці пароперегрівача або реагує на швидкі збурення (наприклад, зміну витрати пари), а зовнішній контур коригує завдання для внутрішнього контуру для підтримання заданої температури на виході з пароперегрівача. Застосування сучасних стратегій керування, таких як каскадна система з ПІ-регулятором та спостерігачем збурень (Disturbance Observer-PI, DOB-PI), дозволяє значно покращити якість придушення збурень та робастність системи. Також розробляються ПІД-регулятори зі змінним інтегральним коефіцієнтом (integral gain scheduling) для адаптації до змінних навантажень котла.

Таким чином, вибір методу регулювання температури перегрітої пари є комплексним завданням, що вимагає врахування багатьох факторів. Сучасні тенденції спрямовані на використання комбінованих та адаптивних систем регулювання, що забезпечують високу точність, швидкодію та економічність в широкому діапазоні режимів роботи котлоагрегату.

### **2.3 Технічна реалізація сучасних систем керування**

Технічна реалізація сучасних систем керування котлоагрегатами базується на використанні передових технологій автоматизації, що забезпечують стабільну, ефективну та безпечну роботу обладнання.

Основні елементи (компонентна база) систем керування включають:

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

- Сенсори (давачі): Призначені для точного вимірювання технологічних параметрів, таких як температура (термопари, термоопори), тиск, витрата палива, води, пари та повітря, рівень води в барабані, концентрація кисню та шкідливих компонентів у димових газах тощо. Сучасні сенсори характеризуються високою точністю, надійністю, стабільністю характеристик та можливістю цифрової передачі даних (наприклад, за протоколами HART, Foundation Fieldbus).

- Контролери: Є "мозком" системи керування. На сьогоднішній день найпоширенішими є програмовані логічні контролери (ПЛК). Вони обробляють сигнали з датчиків, виконують закладені в них алгоритми керування та формують керуючі впливи на виконавчі механізми. Для складних та відповідальних об'єктів, таких як котлоагрегати ТЕС, часто використовуються контролери, що входять до складу розподілених систем керування (DCS).

- Виконавчі механізми: Реалізують керуючі команди від контролерів. До них належать регулюючі клапани (для зміни витрати води, пари, палива), заслінки та шибери (для регулювання потоків повітря та димових газів), приводи насосів та вентиляторів (частотно-регульовані приводи для зміни продуктивності). Сучасні виконавчі механізми часто оснащуються інтелектуальними позиціонерами, що забезпечують точне позиціонування та діагностику.

- Програмне забезпечення: Включає програмне забезпечення для конфігурування та програмування контролерів, SCADA-системи для візуалізації, моніторингу та диспетчерського керування, системи архівування даних, а також спеціалізоване ПЗ для аналізу, оптимізації та діагностики.

Архітектурні рішення: Сучасні АСУ ТП котлоагрегатів, як правило, будуються за багаторівневою ієрархічною архітектурою:

- Нижній (польовий) рівень: Датчики та виконавчі механізми, підключені до модулів вводу/виводу контролерів.

- Середній (контролерний) рівень: ПЛК або контролери DCS, що реалізують алгоритми автоматичного регулювання, логічного керування та захисту.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

- Верхній (операторський/диспетчерський) рівень: SCADA-системи або операторські станції DCS, що забезпечують взаємодію людини з системою, візуалізацію процесів, збір та відображення даних, керування. Для зв'язку між рівнями та компонентами системи використовуються промислові мережі (Industrial Ethernet, Profibus, Modbus, Foundation Fieldbus тощо), що забезпечують надійну та швидку передачу даних.

Актуальні стандарти: Стандартизація відіграє ключову роль у забезпеченні інтегрованості, гнучкості та масштабованості сучасних АСУ ТП.

- IEC 61131-3: Міжнародний стандарт, що визначає мови програмування для ПЛК (LD, FBD, SFC, ST, IL). Його застосування дозволяє уніфікувати процес розробки програмного забезпечення для контролерів різних виробників, спрощує навчання персоналу та підтримку систем. Останнім часом набувають поширення віртуальні ПЛК, які відокремлюють логіку керування від специфічного обладнання, що підвищує гнучкість та полегшує управління великими парками контролерів.

- OPC UA (OLE for Process Control Unified Architecture): Платформонезалежний стандарт для безпечного та надійного обміну даними в промислових системах автоматизації. OPC UA забезпечує інтеграцію даних між пристроями та додатками різних виробників на різних рівнях АСУ ТП, від польового рівня до систем MES (Manufacturing Execution System) та ERP (Enterprise Resource Planning). Він підтримує складні моделі даних та сервіс-орієнтовану архітектуру, що робить його ключовою технологією для Індустрії 4.0 та промислового Інтернету речей (IIoT).

- ISA-95 (ANSI/ISA-95 Enterprise-Control System Integration): Стандарт, що визначає моделі та термінологію для інтеграції систем управління виробництвом (рівень MES) з системами управління підприємством (рівень ERP). Він допомагає структурувати обмін інформацією між цими рівнями, забезпечуючи узгодженість даних та ефективне планування й управління виробничими процесами.

Застосування цих стандартів дозволяє створювати відкриті, гнучкі,

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

масштабовані та інтероперабельні системи керування котлоагрегатами. Це відхід від пропрієтарних, закритих рішень, що домінували в минулому, і крок до створення єдиного інформаційного простору на підприємстві. Така стандартизація спрощує інтеграцію обладнання різних виробників, полегшує модернізацію існуючих систем та знижує загальну вартість володіння АСУ ТП. Це особливо важливо для енергетичних об'єктів, які мають тривалий життєвий цикл та потребують періодичної модернізації для підтримки ефективності та відповідності сучасним вимогам.

### **Висновки до розділу**

Аналіз сучасних систем керування котлоагрегатами свідчить про стійку тенденцію до підвищення рівня автоматизації, інтелектуалізації та інтеграції. Від простих ПД-регуляторів та локальних ПЛК відбувається перехід до комплексних розподілених систем керування (DCS), доповнених можливостями SCADA-систем для моніторингу та диспетчеризації. Новітні напрямки розвитку включають активне впровадження технологій штучного інтелекту, машинного навчання та Інтернету речей для оптимізації режимів роботи, предиктивного обслуговування та підвищення автономності систем.

Вибір методів регулювання ключових параметрів, зокрема температури перегрітої пари, залежить від специфіки об'єкта та вимог до якості керування, при цьому перевага надається комбінованим та адаптивним підходам, таким як каскадні системи з вдосконаленими алгоритмами.

Технічна реалізація сучасних АСК базується на надійній компонентній базі та відкритих архітектурних рішеннях, що підтримуються міжнародними стандартами (IEC 61131-3, OPC UA, ISA-95). Це забезпечує інтероперабельність, гнучкість та можливість подальшої модернізації систем. Проведений аналіз дозволив обґрунтувати вибір оптимальних структурних схем та алгоритмів керування для розроблюваної системи автоматизації котлоагрегату ТП-100, враховуючи критерії надійності, ефективності та можливості інтеграції.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Оптимізація параметрів такої системи повинна здійснюватися на основі математичного моделювання та комп'ютерних експериментів, що дозволяє досягти найкращих показників якості керування.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

## 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОТЛОАГРЕГАТУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

### 3.1 Ідентифікація вхідних, вихідних параметрів, керуючих та збурюючих впливів

Для ефективного синтезу системи автоматичного керування (АСК) котлоагрегатом необхідно чітко визначити його вхідні та вихідні параметри, а також основні керуючі та збурюючі впливи, що визначають його динамічну поведінку.

Вхідні параметри об'єкта керування котлоагрегатом включають:

- Подачу палива (наприклад, витрата вугільного пилу).
- Подачу повітря для горіння (загальна витрата, розподіл по зонах).
- Витрату живильної води, що подається в економайзер та барабан котла.
- Витрату вприскуваної води (конденсату) в пароохолоджувачі для регулювання температури перегрітої пари. Зовнішні впливи, такі як температура навколишнього повітря, якість палива (вологість, зольність, теплота згорання), також можуть розглядатися як вхідні збурюючі параметри.

Вихідні параметри, що характеризують стан котлоагрегату та якість виробленої продукції, включають:

- Температуру перегрітої пари на виході з котла (первинний та вторинний перегрів).
- Тиск перегрітої пари на виході з котла.
- Рівень води в барабані котла.
- Паропродуктивність котла.
- Концентрацію шкідливих викидів у димових газах ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_x$ ).
- Температуру відхідних димових газів.
- Ефективність горіння (ККД котла).

При аналізі динаміки пароперегрівача як одного з ключових елементів

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

котлоагрегату, що визначає якість виробленої пари, виділяють наступні впливи :

- Керуючий вплив: Витрата живильної води ( $Q_{впр}$ ) на впрыск у пароохолоджувач.
- Збурюючі впливи:
  - Зміна температури пари на вході в пароперегрівач ( $T_2$ ).
  - Зміна інтенсивності опалення пароперегрівача ( $f_Q$ ), що залежить від теплового навантаження топки.
  - Зміна витрати пари через пароперегрівач ( $f_D$ ), що визначається навантаженням турбіни.

Динаміка котлоагрегату, особливо його пароперегрівальної частини, характеризується значною інерційністю та наявністю суттєвих транспортних запізнень. Це означає, що реакція вихідних параметрів (наприклад, температури перегрітої пари) на зміну керуючих або збурюючих впливів відбувається не миттєво, а з певним запізненням та розтягується в часі. Така поведінка ускладнює побудову ефективних систем регулювання.

Для покращення якості перехідних процесів при регулюванні температури пари часто застосовують двохімпульсну (каскадну) систему автоматичного регулювання (рисунок 3.1).

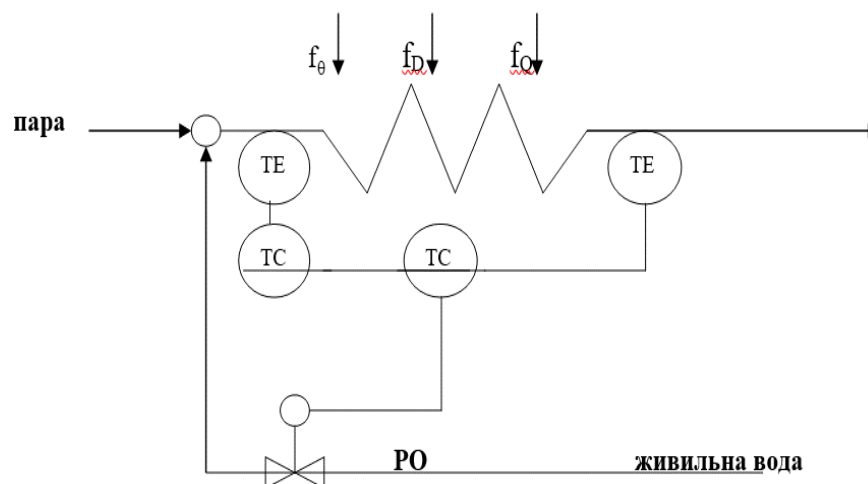


Рисунок 3.1 - Схема двохімпульсного регулювання температури пари

Внутрішній, малоінерційний контур такої системи створюється шляхом введення сигналу від проміжної температури пари (наприклад, після першого ступеня пароперегрівача). Цей внутрішній контур дозволяє ефективно відфільтрувати високочастотні збурення, що надходять з попередніх пакетів пароперегрівача, тоді як зовнішній, більш інерційний контур забезпечує підтримання вихідної регульованої величини (кінцевої температури перегрітої пари) на заданому значенні. Цей підхід є особливо актуальним для об'єктів зі складною динамікою, де прості одноконтурні системи не можуть забезпечити необхідної точності та швидкодії.

### 3.2 Розробка та детальний аналіз структурної схеми об'єкта керування

Для синтезу системи автоматичного регулювання температури перегрітої пари необхідно представити пароперегрівач у вигляді структурної схеми, що відображає зв'язки між вхідними та вихідними величинами. На рисунку 3.2 з наведеною узагальненою структурною схемою пароперегрівача як об'єкта керування.

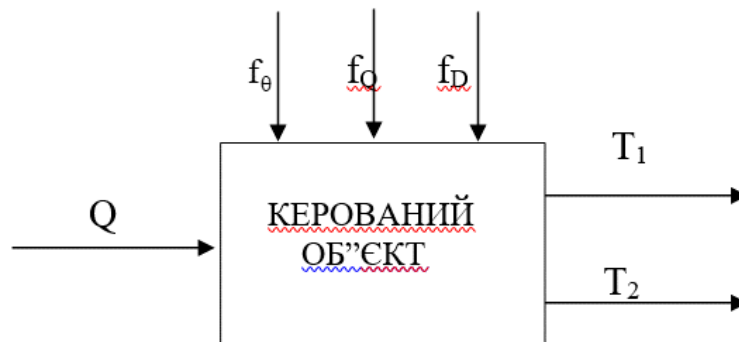


Рисунок 3.2 - Структурна схема пароперегрівача як об'єкта керування

Згідно з цією схемою, вхідні змінні поділяються на дві групи:

**Керуючі впливи:** Це впливи, за допомогою яких можна цілеспрямовано змінювати стан об'єкта керування. Для пароперегрівача основним керуючим впливом є витрата охолоджувача (наприклад, живильної води  $Q_{впр}$ ), що подається у вприскувальний пароохолоджувач.

**Збурюючі впливи:** Це неконтрольовані або частково контрольовані впливи,

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

які викликають відхилення вихідних параметрів від заданих значень. До основних збурюючих впливів для пароперегрівача належать:

- $T_2$  – зміна температури пари, що надходить у пароперегрівач (наприклад, з барабана котла або попереднього ступеня перегріву).
- $f_Q$  – зміна інтенсивності опалення пароперегрівача, зумовлена зміною теплового навантаження топки (витрати палива, повітря).
- $f_D$  – зміна витрати пари через пароперегрівач, викликана зміною навантаження споживача (турбіни).

Вихідними величинами, що характеризують стан пароперегрівача, є температура пари на виході з нього ( $T_1$ ) та, можливо, проміжні температури ( $T_{\text{пром}}$ ) на різних його ділянках, якщо використовується каскадна система регулювання.

Пароперегрівач як об'єкт регулювання при різних збурюючих та керуючих впливах у динамічному відношенні є об'єктом із самовирівнюванням. Це означає, що після ступінчастої зміни вхідного впливу (керуючого або збурюючого) вихідна величина (температура пари) з часом прагне до нового сталого значення без необмеженого зростання або коливань (за відсутності системи регулювання). Однак, цей процес супроводжується наявністю значного транспортного запізнення ( $\tau_T$ ) та перехідного (аперіодичного) запізнення ( $\tau_{\text{п}}$ ), зумовлених часом проходження пари через довгі труби пароперегрівача та тепловою інерцією металу труб і самої пари.

Розуміння того, що об'єкт має властивість самовирівнювання, але зі значними запізненнями, є ключовим для вибору типу регуляторів та їх налаштувань. Наявність транспортного запізнення суттєво обмежує максимально можливу швидкодію замкнутої системи автоматичного регулювання та може призвести до коливальності або навіть втрати стійкості, якщо параметри регулятора обрані неправильно. Для таких об'єктів часто виявляється недостатнім використання простих П-регуляторів, оскільки вони не можуть усунути статичну помилку регулювання. Тому перевага надається ПІ- або ПІД-регуляторам, інтегральна складова яких забезпечує астатизм системи, а диференціальна (за

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

наявності) – покращує динаміку перехідних процесів, частково компенсуючи вплив запізнень. Структурна схема та якісний опис динамічних властивостей є фундаментом для подальшого кількісного визначення передавальних функцій та синтезу ефективної системи керування.

### **3.3 Апаратне та програмне забезпечення для проведення експериментальних досліджень та моделювання динаміки**

Для проведення експериментального визначення динамічних характеристик котлоагрегату ТП-100, як описано в , використовується штатне та спеціально встановлене обладнання, а також програмні засоби для обробки даних та моделювання.

Апаратне забезпечення :

- Термопара ТХК-0579: Використовується для вимірювання температури перегрітої пари. Термопари типу ТХК (хромель-копель, тип L) призначені для вимірювання температур в діапазоні від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+600^{\circ}\text{C}$  (або до  $+800^{\circ}\text{C}$  для деяких виконань). Захисна арматура часто виготовляється зі сталі 12Х18Н10Т, що забезпечує стійкість до високих температур та агресивних середовищ. Робочий спай термопари зазвичай ізольований.

- Виконавчий механізм ДУП-М: Застосовується для дистанційного керування положенням регулюючого органу (наприклад, клапана на лінії вприску). ДУП-М (Дистанционный Указатель Положения-Модернизированный) – це показчик положення, призначений для дистанційної індикації положення вихідного вала електричного виконавчого механізму, що має реостатний або індуктивний датчик. Живлення – змінний струм 220В, 50Гц. Залежність показів приладу від положення вала виконавчого механізму лінійна.

- Електричний клапан типу ЕСПА-02-РГ: Використовується як регулюючий орган на лінії подачі живильної води. Це, ймовірно, електроприводний регулюючий клапан. Наприклад, клапан 25ч940нж (ЕСПА 02 РГ) може мати номінальний діаметр  $D_n$  80 мм, номінальний тиск  $P_n$  1.6 МПа, робочу температуру від  $-30$  до  $+225^{\circ}\text{C}$  та лінійну або рівновідсоткову пропускну

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

характеристику. Пропускна здатність у закритому стані, зазначена в як 0.3%, є важливим показником герметичності.

- Регулюючий електронний прилад Р-25-1.2: Використовується для реалізації закону регулювання та формування керуючого сигналу на виконавчий механізм. Прилади типу Р25 (наприклад, Р25.1.2М) – це пропорційно-інтегральні регулюючі пристрої, що сприймають уніфіковані вхідні сигнали (наприклад, 0-5 мА, 4-20 мА, 0-10 В) та формують імпульсні або аналогові вихідні сигнали для керування виконавчими механізмами. Вони можуть мати вбудований індикатор положення виконавчого механізму.

- Прилад А-543: Застосовується для вимірювання вихідної координати (температури), клас точності 0.2.

Апаратура, описана в, є типовою для систем автоматизації, що створювалися в минулі десятиліття. Сучасні дослідження та промислові АСК все частіше покладаються на цифрові датчики з вищою точністю та стабільністю, інтелектуальні виконавчі механізми з розширеними функціями діагностики та зворотного зв'язку, а також на потужні програмно-технічні комплекси (ПТК) на базі промислових комп'ютерів та контролерів з відкритими архітектурами.

Програмне забезпечення: У роботі для обробки результатів експерименту, апроксимації кривих розгону та побудови графіків згадується використання програмних пакетів MathCAD та MATLAB. Ці пакети є потужними інструментами для інженерних розрахунків, математичного моделювання та візуалізації даних.

- MathCAD: Зручний для виконання аналітичних розрахунків, символічних перетворень та оформлення технічної документації.

- MATLAB (з Simulink): Широко використовується для моделювання динамічних систем, синтезу систем керування, аналізу їх стійкості та якості, а також для обробки експериментальних даних.

Використання такого спеціалізованого ПЗ дозволяє створювати більш точні та деталізовані моделі котлоагрегатів, враховувати нелінійності та взаємозв'язки між різними підсистемами, що в кінцевому підсумку сприяє розробці більш

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

ефективних та робастних систем автоматичного керування.

### 3.4 Комплексне дослідження динаміки об'єкта

Визначення динамічних властивостей пароперегрівача, тобто отримання його математичної моделі у вигляді передавальних функцій по різних каналах керуючого та збурюючих впливів, є необхідним етапом для синтезу системи автоматичного регулювання температури перегрітої пари.

Теоретично, передавальні функції можна визначити аналітично, розв'язуючи систему диференціальних рівнянь, що описують процеси теплообміну та руху пари в пароперегрівачі. Однак, такий підхід пов'язаний зі значними обчислювальними труднощами, необхідністю точного знання численних теплофізичних параметрів та геометричних характеристик, а також з тим, що фактичні динамічні властивості реального пароперегрівача можуть відрізнятися від розрахункових внаслідок зносу обладнання, зміни умов експлуатації, наявності відкладень на поверхнях нагріву тощо.

Тому на практиці, особливо при налагодженні систем автоматичного регулювання на діючих котлоагрегатах, передавальні функції часто визначають на основі експериментально отриманих часових характеристик (кривих розгону) шляхом їх апроксимації типовими динамічними ланками.

Методика проведення активного експерименту для зняття кривих розгону полягає у наступному :

1. Стабілізація режиму роботи котлоагрегату: перед нанесенням збурення домагаються постійної витрати пари та підживлення котла.

2. Нанесення збурюючого впливу: збурення наноситься шляхом ступінчастої зміни положення регулюючого органу на лінії подачі охолоджувача (наприклад, живильної води у вприскувальний пароохолоджувач) за допомогою виконавчого механізму, керованого дистанційно. У наведеному прикладі ступінчасто змінюють подачу живильної води на 15%.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

3. Реєстрація реакції об'єкта: фіксується зміна температури пари перед пароохолоджувачем (якщо досліджується допоміжний канал для каскадної системи) та після пароперегрівача (основний регульований параметр) в часі.

4. Побудова кривої розгону: за отриманими даними будується графік залежності зміни температури від часу. Початком відліку часу є момент нанесення збурення.

Після отримання експериментальних кривих розгону проводиться їх апроксимація передавальною функцією, що зазвичай являє собою послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого або другого порядку та ланки чистого запізнення.

Результати експерименту по основному та допоміжному каналах регулювання приведено відповідно в таблиця 3.1 та 3.2

Таблиця 3.1 - Результати експерименту по основному і допоміжному каналах

t, с	$T_{осн.}, ^\circ\text{C}$	$T_{доп.}, ^\circ\text{C}$
0	500	451
40	515	463
80	532,6	480,4
120	542	492
160	544,6	495,4
200	546,2	498,7
240	547,3	498,8
280	547,7	499,3
320	547,8	499,9
360	548,1	500
400	548	500

Згідно таблиця 3.1 побудуємо експериментальну перехідну характеристику по основному каналу регулювання (рисунок 3.3, 3.4).

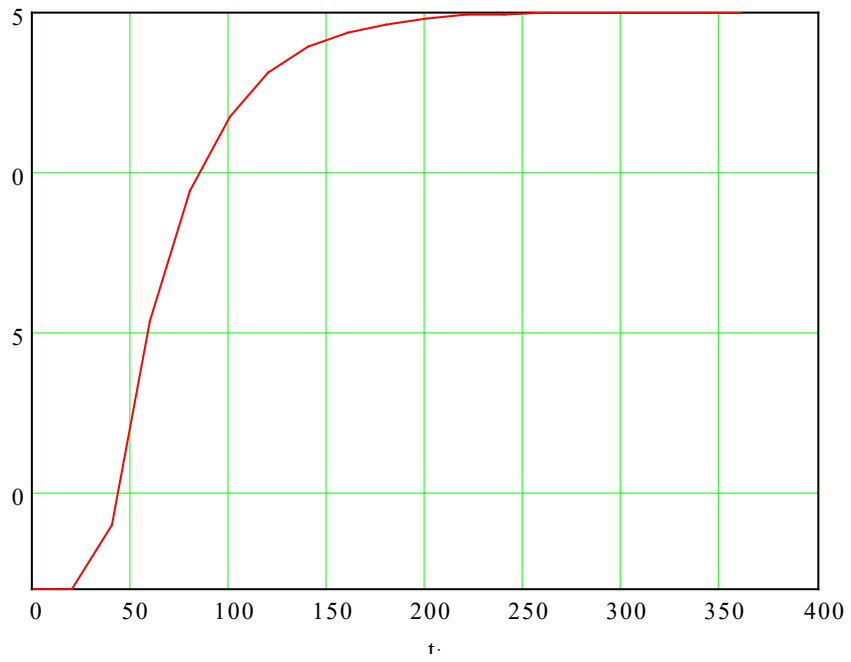


Рисунок 3.3 – Експериментальна перехідна характеристика по основному каналу

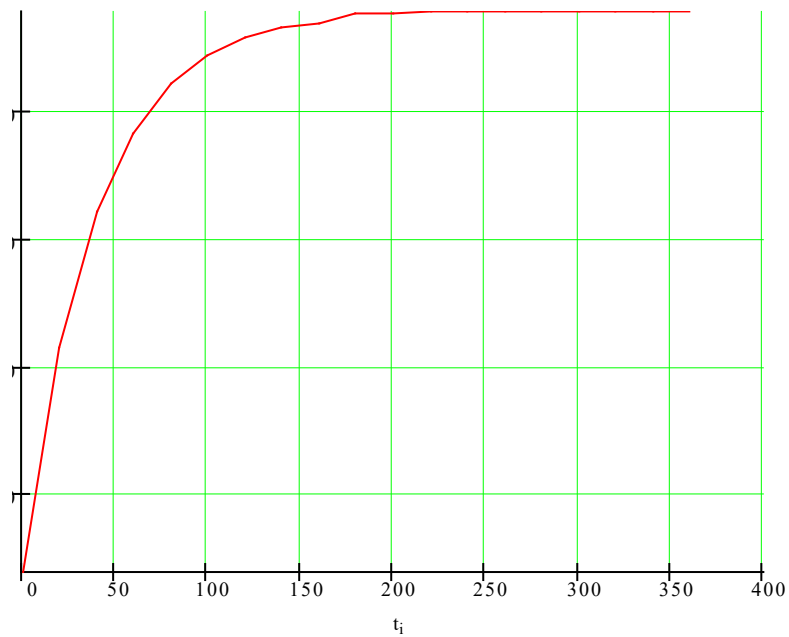


Рисунок 3.4 – Експериментальна перехідна характеристика по допоміжному каналу

Згідно даних експерименту будемо експериментальну перехідну характеристику в безрозмірних одиницях (рисунок 3.5).

Отримали передавальну функцію:

$$W(p) = \frac{1}{601.834p^2 + 51.853p + 1} \quad (3.1)$$

Максимальна похибка апроксимації в точці  $T=20$  с рівна 1,2%.

Так, як даний канал має запізнення 10 с то передавальна функція матиме вигляд:

$$W(p) = \frac{1}{601.834p^2 + 51.853p + 1} \cdot e^{-10p} \quad (3.2)$$

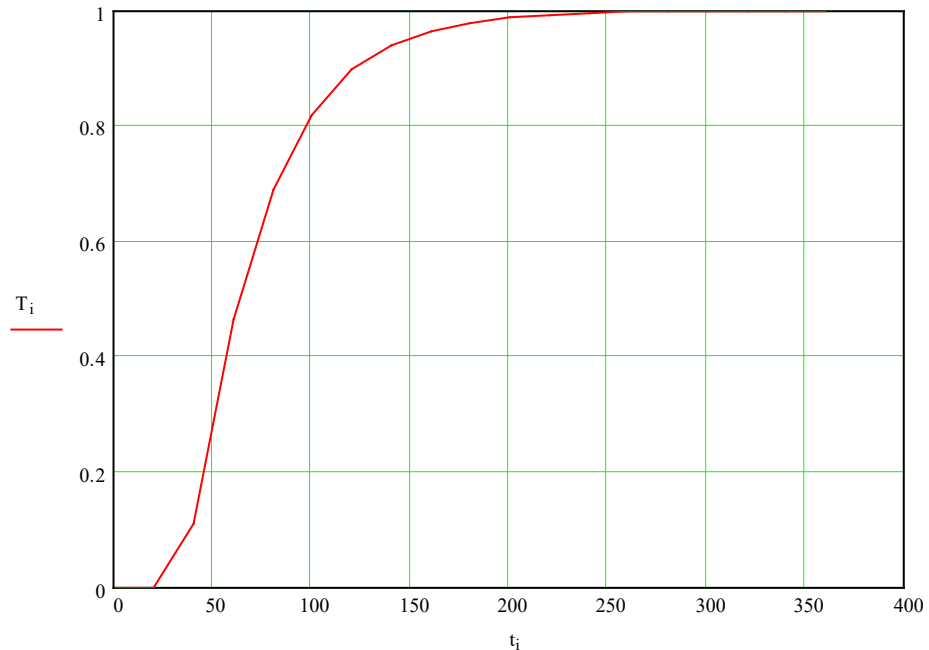


Рисунок 3.5 – Експериментальна перехідна характеристика основного каналу в безрозмірних одиницях

Таким же способом виконуємо апроксимацію для кривої по допоміжному каналу.

Будуємо експериментальну перехідну характеристику в безрозмірних одиницях по допоміжному каналу (рисунок 3.6).

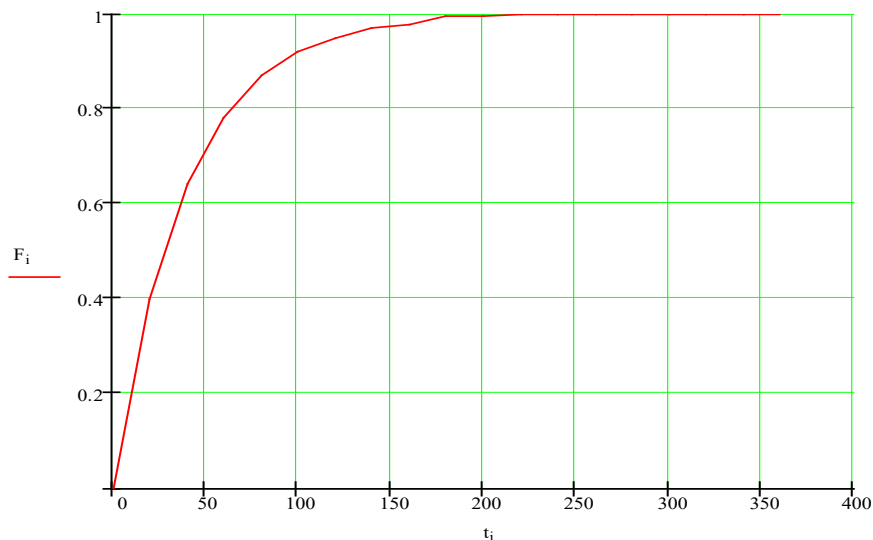


Рисунок 3.6 – Експериментальна перехідна характеристика допоміжного каналу в безрозмірних одиницях

Апроксимуємо отриману перехідну характеристику.

$$W(p) = \frac{1}{39.226p + 1} \quad (3.3)$$

Максимальна похибка апроксимації в точці T=160 с рівна 0,6%

Хоча експериментальне визначення кривих розгону є прагматичним та поширеним підходом для ідентифікації динаміки існуючого обладнання, сучасна інженерна практика все частіше використовує потужні програмні засоби для математичного моделювання теплоенергетичних систем. Такі пакети, як APROS, DWSIM, MATLAB Simulink, TRNSYS, EBSILON Professional, дозволяють створювати деталізовані динамічні моделі котлоагрегатів, що враховують нелінійності, взаємний вплив численних параметрів, різні режими роботи та конструктивні особливості. Ці моделі можуть базуватися як на фундаментальних законах тепломасообміну (моделі на перших принципах), так і на ідентифікації за експериментальними даними з використанням сучасних методів (наприклад, моделі в просторі станів, нейронні мережі). Перевагою такого підходу є можливість всебічного дослідження динаміки об'єкта в широкому діапазоні умов, аналізу впливу модернізації окремих вузлів, а також тестування та налагодження складних алгоритмів керування (наприклад, модельно-прогнозуючого керування – MPC ) ще до їх впровадження на реальному об'єкті, що значно знижує ризики та витрати. Поєднання експериментальних даних (для верифікації та валідації

моделей) з можливостями сучасного моделювання дозволяє отримати найбільш повне та точне уявлення про динамічні властивості котлоагрегату як об'єкта керування.

### **Висновки до розділу**

У даному розділі було проведено детальний аналіз котлоагрегату ТП-100, зокрема його пароперегрівача, як об'єкта керування. Розроблено структурну схему, що відображає основні керуючі та збуджуючі впливи на температуру перегрітої пари, а також внутрішні зв'язки системи з точки зору автоматизації.

Для визначення динамічних властивостей об'єкта та отримання його математичної моделі у вигляді передавальних функцій було проведено активний експеримент. Експериментальні дані, отримані шляхом реєстрації кривих розгону по основному та допоміжному каналах регулювання, були оброблені та апроксимовані за допомогою комп'ютерних засобів. Отримана математична модель, що складається з передавальних функцій для відповідних каналів, характеризується високою точністю, оскільки похибка апроксимації не перевищує 2.5%, що відповідає поставленим вимогам для подальшого синтезу системи автоматичного керування.

Було також розглянуто апаратне забезпечення, що використовується для проведення експерименту, та програмні засоби для обробки даних і моделювання. Наголошено на важливості поєднання експериментальних методів ідентифікації з сучасними підходами до математичного моделювання для всебічного та точного аналізу динаміки складних теплотехнічних об'єктів, яким є котлоагрегат. Отримана модель слугує надійною основою для розробки та дослідження різних варіантів систем автоматичного керування в наступному розділі.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

## 4 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КОТЛОАГРЕГАТОМ ТП-100

### 4.1 Синтез одноконтурної АСК

Для регулювання температури перегрітої пари по основному каналу (вплив зміни витрати охолоджувача на кінцеву температуру) в одноконтурній системі автоматичного регулювання (АСР) був обраний пропорційно-інтегральний (ПІ) закон регулювання. Передавальна функція ПІ-регулятора в загальному вигляді записується як:

$$W_p(p) = \frac{C_1 p + C_0}{p}, \quad (4.1)$$

де  $C_1$  – коефіцієнт пропорційної частини,  $C_0$  – коефіцієнт інтегральної частини.

Визначимо параметри регулятора  $C_1$ ,  $C_0$ . Знайдемо передавальну функцію замкнутої системи.

Передавальна функція розімкнутої системи має вигляд:

$$W(p) = W_0(p) \cdot W_p(p); \quad (4.2)$$

$$W_{\text{роз}}(p) = \frac{1}{601.834 p^2 + 51.853 p + 1} \cdot e^{-10p} \cdot \frac{C_1 p + C_0}{p}$$

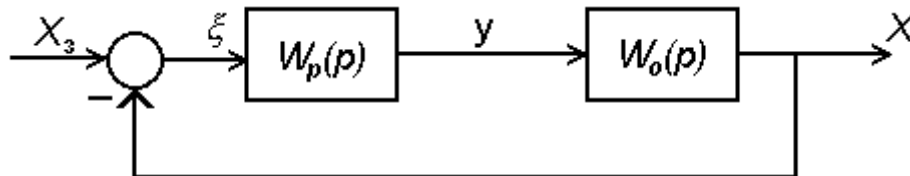
Тоді передавальна функція замкнутої системи, структурна схема якої зображена на рисунок 4.1 має вигляд:

$$W_{\text{зак}}(\delta) = \frac{W_{\text{роз}}(\delta)}{1 + W_{\text{роз}}(\delta)}. \quad (4.3)$$

Вибір параметрів регулятора проводимо за допомогою. Отримали наступне значення:  $C_0=0,0001$ ,  $C_1=0,9871$ .

$$W_p(p) = \frac{0.9871 p + 0.0001}{p} \quad (4.4)$$

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45



$X_3$  - сигнал завдання;  $X$  - вихідний сигнал;  $\zeta$  - розбаланс;  $W_p(p)$  - передавальна функція регулятора;  $W_o(p)$  - передавальна функція керованого об'єкта

Рисунок 4. 1 - Структурна схема одноконтурної АСК

Підставимо значення  $C_0$  і  $C_1$  у вираз (4.2) і підставивши її в (4.3), одержимо передавальні функції розімкнутої і замкнутої систем:

$$W_{\text{оіс}}(p) = \frac{9.871p^2 + 0.9881p + 0.0001}{p(601.834p^2 + 51.853p + 1)} \quad (4.5)$$

$$W_{\text{ззі}}(\delta) = \frac{9.871p^2 + 0.9881p + 0.0001}{601.834p^3 + 61.724p^2 + 1.9881p + 0.0001} \quad (4.6)$$

Коефіцієнт передачі регулятора:  $K_p = C_1 = 18,407$ .

Сучасна теорія автоматичного керування пропонує значно ширший арсенал методик, які можуть забезпечити кращу якість регулювання, особливо для об'єктів із запізненням та змінними параметрами. До таких методик належать:

- Методи на основі частотних характеристик: Наприклад, налаштування за бажаними запасами стійкості по амплітуді та фазі.
- Метод внутрішньої моделі (ІМС-PID): Дозволяє отримати аналітичні вирази для параметрів ПІД-регулятора на основі моделі об'єкта, забезпечуючи хороший компроміс між швидкодією та робастністю.
- Методи багатоцільової оптимізації: Дозволяють одночасно оптимізувати кілька показників якості (наприклад, час регулювання, перерегулювання, інтегральну помилку) та враховувати робастність системи до зміни параметрів об'єкта.
- Автоматичне налаштування (Autotuning): Багато сучасних промислових ПІД-регуляторів мають вбудовані функції автоматичного

налаштування, які проводять короткочасний експеримент на об'єкті та розраховують оптимальні параметри.

Застосування таких просунутих методик, часто реалізованих у програмних пакетах типу MATLAB, могло б забезпечити вищу якість регулювання для одноконтурної АСР котлоагрегату, особливо з урахуванням його інерційності та запізнення.

#### 4.2 Синтез каскадної АСК

Для підвищення якості регулювання температури перегрітої пари, особливо для об'єктів зі значною інерційністю та наявністю проміжних збурень, доцільно використовувати каскадну систему автоматичного регулювання (АСР). У такій системі до основного контуру регулювання додається допоміжний, малоінерційний контур, який стабілізує проміжну змінну або компенсує частину збурень до того, як вони вплинуть на основний регульований параметр. Функціональна схема автоматизації із застосуванням каскадної АСР для регулювання температури пари наведена на рисунок 4.2.

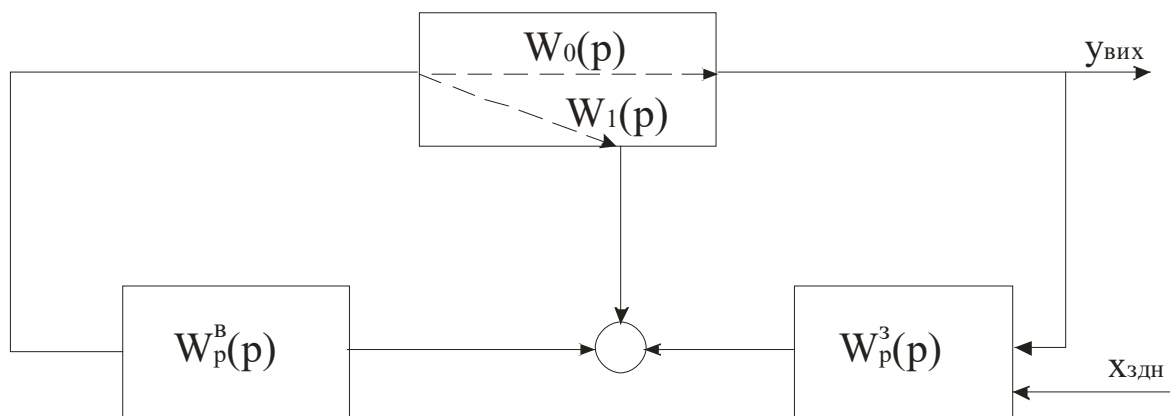


Рисунок 4.2 - Структурна схема каскадної АСР

Передавальна функція основного каналу регулювання має вигляд:

$$W(p) = \frac{10p + 1}{601.834p^2 + 51.853p + 1} \quad (4.7)$$

Передавальна функція по допоміжному каналу рівна:

$$W_1(p) = \frac{1}{39.226p + 1} \quad (4.8)$$

Розрахунок каскадної АСР починається з внутрішнього (допоміжного) контуру, оскільки його інерційність значно менша, ніж основного. Однак, у розрахунок починається з основного регулятора за припущенням, що робоча частота основного контуру  $\omega_{осн}$  набагато менша, ніж допоміжного  $\omega_{доп}$ , що дозволяє спростити передавальну функцію замкнутого внутрішнього контуру. Еквівалентна схема для розрахунку основного регулятора каскадної системи представлена на рисунку 4.3.

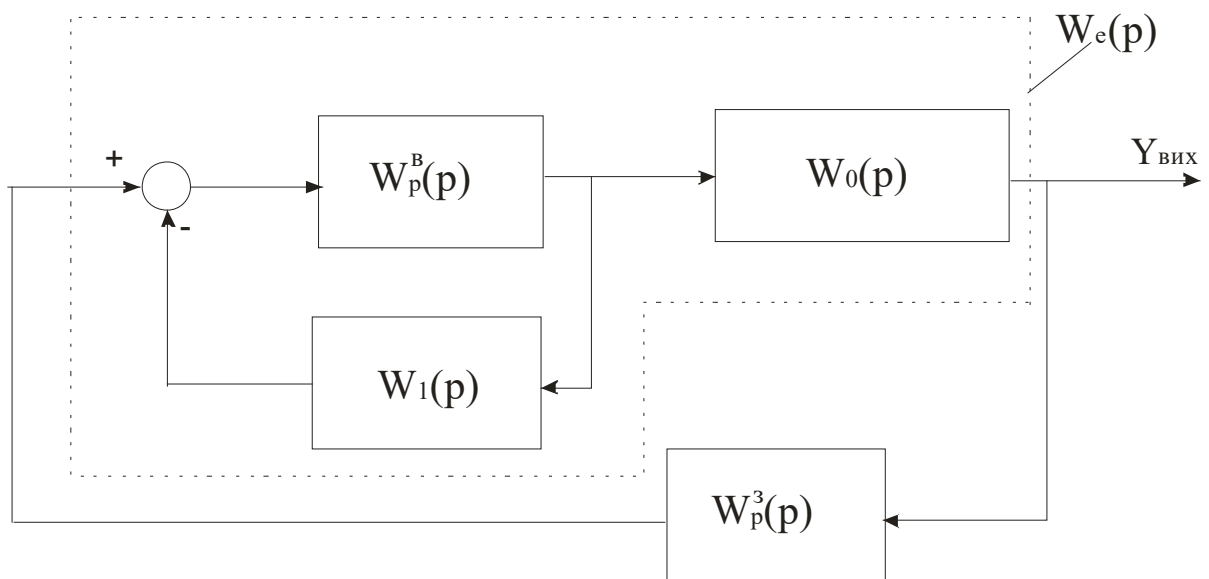


Рисунок 4.3 - Структурна еквівалентної схеми каскадної АСК

Передавальна функція для даного об'єкта має вигляд:

$$W'_a(\delta) = \frac{W_\delta^a(\delta)}{1 + W_1(p) \cdot W_p^a} W_0(p). \quad (4.9)$$

Допустимо, що робоча частота основного контуру  $W'_p$  набагато менша, ніж допоміжного  $W''_p$ . Тоді при  $W = W'_p$  справедливою буде нерівність:

$$\frac{1}{(W_p^a(j\omega))} \ll (W_1(j\omega)). \quad (4.10)$$

Враховуючи (4.10) можна записати, що  $W'_e = \frac{W_0(p)}{W_1(p)}$

$W_0(p)$   $W_1(p)$ , отримаємо:

$$W_e'(p) = \frac{\frac{10p+1}{601.834p^2 + 51.853p+1}}{\frac{1}{39.226p+1}} = \frac{392p^2 + 49.23p+1}{601.83p^2 + 51.85p+1} \quad (4.11)$$

Отже загальна еквівалентна передавальна функція з перетвореним запізненням матиме вигляд:

$$W_e'(p) = \frac{392p^2 + 49.23p+1}{601.83p^2 + 51.85p+1} \quad (4.12)$$

Розрахунок параметрів налаштування основного регулятора виконаємо за допомогою програми.

В якості регулятора вибираємо ПІ регулятор.

Отримаємо  $C_0=1.339$ ,  $C_1=0.9476$ . Передавальна функція основного регулятора матиме вигляд:

$$W_p^3(p) = \frac{0.9476p+1.339}{p} \quad (4.13)$$

Знаходимо параметри на лаштування внутрішнього (допоміжного) регулятора. Передавальна функція для такого об'єкту має вигляд:

$$W_e''(p) = -W_1(p) + W_0(p) \cdot W_p^3(p). \quad (4.14)$$

Підставимо в цю формулу значення передавальної функції  $W_1(p)$ ,  $W_0(p)$  та  $W_p^3(p)$  і отримаємо:

$$W_e''(p) = -\frac{1}{39.226p+1} + \frac{10p+1}{601.834p^2 + 51.853p+1} \cdot \frac{0.9476p+1.339}{p}$$

Після алгебраїчних перетворень отримаємо:

$$W_e''(p) = \frac{-0.0744 \cdot p^3 + 567.4 \cdot p^2 + 66.86 \cdot p + 1.339}{29970 \cdot p^4 + 2870 \cdot p^3 + 92.92 \cdot p^2 + p}$$

Здійснимо розрахунок оптимальних параметрів налаштування ПІД - регулятора:

$$C_2 = 35.86; C_1 = 14.901; C_0 = 1.2127.$$

Тоді ми отримаємо наступну передавальну функцію допоміжного регулятора:

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_p^e(p) = \frac{35.86 \cdot p^2 + 14.901p + 1.2127}{p} \quad (4.15)$$

Знайдемо еквівалентну передавальну функцію каскадної АСР.

Структурна схема каскадної АСР приведеної на рисунок 4.3 матиме таку еквівалентну передавальну функцію для даної схеми.

$$W_e(p) = \frac{W_p^3(p) \cdot W_0(p) \cdot W_p^a(\delta)}{W_p^3(p) \cdot W_0(p) \cdot W_p^a(\delta) + W_1(p) \cdot W_p^a(p) + 1} \quad (4.16)$$

Підставимо передавальні функції  $W_p^3$ ,  $W_0$ ,  $W_1$ ,  $W_p^a$  і після всіх алгебраїчних перетворень і зведення доданків отримаємо:

$$W_e(p) = \frac{6268473 \cdot p^7 + 12697044 \cdot p^6 + 6219211.8 \cdot p^5 + 1209359 \cdot p^4 + 112007.4 \cdot p^3 + 5174.3 \cdot p^2 + 115.9 \cdot p + 1}{33263546.8 \cdot p^7 + 22204433.5 \cdot p^6 + 7660098.5 \cdot p^5 + 1318965.517 \cdot p^4 + 116379.3 \cdot p^3 + 5206 \cdot p^2 + 116.6 \cdot p + 1} \quad (4.17)$$

Каскадна АСК є ефективним рішенням для покращення якості регулювання температури пари, оскільки внутрішній контур, що діє на менш інерційний об'єкт  $W_0(p)$ , дозволяє швидше реагувати на збурення, що виникають у тракці подачі охолоджувача або на вході в пароперегрівач (наприклад, коливання тиску чи температури живильної води). Це зменшує вплив таких збурень на кінцеву температуру перегрітої пари  $T_1$ . Використання ПД-регулятора у внутрішньому контурі, як запропоновано в , додатково покращує динаміку цього контуру, забезпечуючи швидку та точну стабілізацію проміжної температури. Однак, ПД-регулятор вимагає ретельного налаштування всіх трьох компонент (пропорційної, інтегральної та диференціальної) для уникнення надмірної коливальності, забезпечення стійкості та оптимальної реакції на збурення. Неправильне налаштування ПД-регулятора може призвести до погіршення якості регулювання або навіть до втрати стійкості внутрішнього контуру, що негативно позначиться на роботі всієї каскадної системи.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 4.3 Комплексне дослідження на стійкість розроблених одноконтурної та каскадної АСК

Після синтезу систем автоматичного регулювання та визначення параметрів регуляторів необхідно провести аналіз їх стійкості. Стійкість є фундаментальною вимогою до будь-якої АСК, оскільки нестійка система не може виконувати свої функції і може призвести до аварійних ситуацій. У роботі для дослідження стійкості одноконтурної та каскадної АСК застосовано три класичні критерії: Гурвіца, Михайлова та Найквіста.

Дослідження на стійкість одноконтурної АСК.

1.Критерій Михайлова: Цей частотний критерій базується на аналізі годографа Михайлова  $M(j\omega)=D(j\omega)$ , де  $D(p)$  – характеристичний поліном замкнутої системи. Для стійкості системи необхідно, щоб годограф  $M(j\omega)$  при зміні частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$  послідовно обійшов  $n$  квадрантів проти годинникової стрілки, де  $n$  – порядок характеристичного полінома (рис.4.4).

$$W_{\text{cii}}(\delta) = \frac{9.871p^2 + 0.9881p + 0.0001}{601.834p^3 + 61.724p^2 + 1.9881p + 0.0001}$$

Прирівнюємо знаменник до нуля

$$601.834p^3 + 61.724p^2 + 1.9881p + 0.0001 = 0$$

Зробимо підстановку  $p = j\omega$

$$-601.834 \cdot j\omega^3 - 61.724 \cdot \omega^2 + 1.9881 \cdot j\omega + 0.0001 = 0$$

Виділимо дійсну та уявну частину:

$$PW(j\omega) = -61.724 \cdot \omega^2 + 0.0001$$

$$QW(j\omega) = -601.834 \cdot j\omega^3 + 1.9881 \cdot j\omega$$

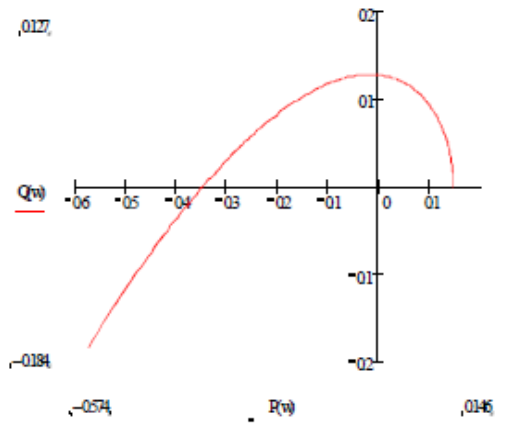


Рисунок 4.4 – Годограф Михайлова для одноконтурної системи

Побудований годограф Михайлова (попередньо проходить три квадранти, що відповідає порядку полінома ( $n=3$ )). Отже, за критерієм Михайлова одноконтурна АСР є стійкою.

2.Критерій Найквіста: Цей частотний критерій аналізує амплітудно-фазову частотну характеристику (АФЧХ)  $W_{роз}(j\omega)$  розімкнутої системи. Система стійка, якщо годограф  $W_{роз}(j\omega)$  при зміні  $\omega$  від  $-\infty$  до  $+\infty$  не охоплює точку  $(-1, j0)$  для стійкої розімкнутої системи. Побудована АФЧХ (Рисунок 4.5) не охоплює точку  $(-1, j0)$ , що підтверджує стійкість системи.

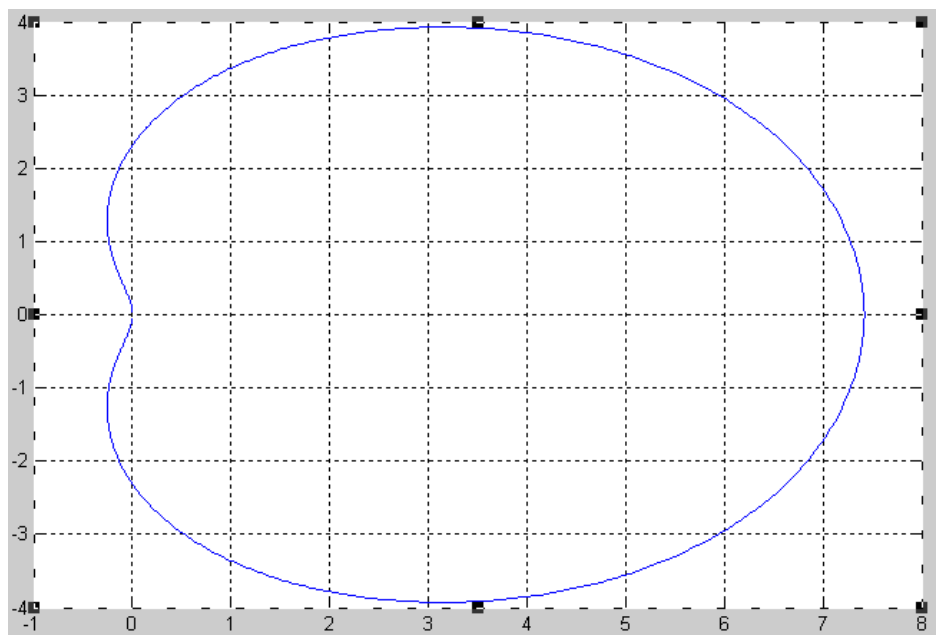


Рисунок 4.4 - АФЧХ розімкнутої одноконтурної системи

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## Дослідження на стійкість каскадної АСК

1. Критерій Михайлова: Характеристичний поліном замкнутої каскадної системи

$$W_e(p) = \frac{6268473 \cdot p^7 + 12697044 \cdot p^6 + 6219211.8 \cdot p^5 + 1209359 \cdot p^4 + 112007.4 \cdot p^3 + 5174.3 \cdot p^2 + 115.9 \cdot p + 1}{33263546.8 \cdot p^7 + 22204433.5 \cdot p^6 + 7660098.5 \cdot p^5 + 1318965.517 \cdot p^4 + 116379.3 \cdot p^3 + 5206 \cdot p^2 + 116.6 \cdot p + 1}$$

Прирівнюємо знаменник до нуля

$$33263546.8 \cdot p^7 + 22204433.5 \cdot p^6 + 7660098.5 \cdot p^5 + 1318965.517 \cdot p^4 + 116379.3 \cdot p^3 + 5206 \cdot p^2 + 116.6 \cdot p + 1 = 0$$

Зробимо підстановку  $p = j\omega$

$$-33263546.8 \cdot \omega^7 j - 22204433.5 \cdot \omega^6 + 7660098.5 \cdot \omega^5 j + 1318965.517 \cdot \omega^4 - 116379.3 \cdot \omega^3 j - 5206 \cdot \omega^2 + 116.6 \cdot j\omega + 1 = 0$$

Виділимо дійсну та уявну частину:

$$PW(j\omega) = -22204433.5 \cdot \omega^6 + 1318965.517 \cdot \omega^4 - 5206 \cdot \omega^2 + 1$$

$$QW(j\omega) = -33263546.8 \cdot \omega^7 j + 7660098.5 \cdot \omega^5 j - 116379.3 \cdot \omega^3 j + 116.6 \cdot j\omega$$

Годограф (рисунок 4.5) послідовно проходить шість квадрантів.

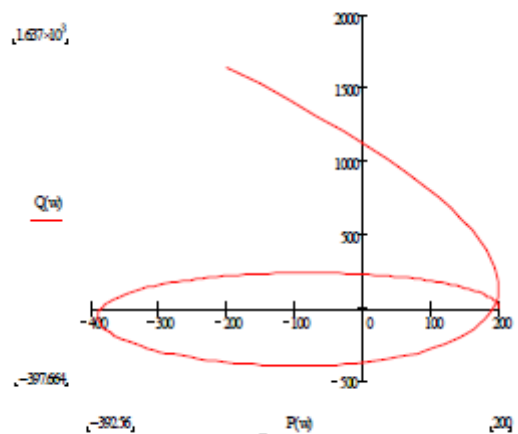


Рисунок 4.6 – Годограф Михайлова каскадної АСК

Таким чином каскадна система є стійкою.

2. Критерій Найквіста: АФЧХ розімкнутої каскадної системи будується на основі її передавальної функції

$$W_e'(p) = \frac{W_p^e(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_p^e} W_0(p) \cdot W_p^z(p).$$

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Передавальна характеристика рівна:

$$W_e(p) = \frac{13330 \cdot p^5 + 26050 \cdot p^4 + 11370 \cdot p^3 + 1738 \cdot p^2 + 101 \cdot p + 1.624}{57370 \cdot p^5 + 16180 \cdot p^4 + 1855 \cdot p^3 + 81.01 \cdot p^2 + 1.213 \cdot p}$$

Побудована АФЧХ (рисунок 4.7) з використанням MatLAB не охоплює точку  $(-1, j0)$ .

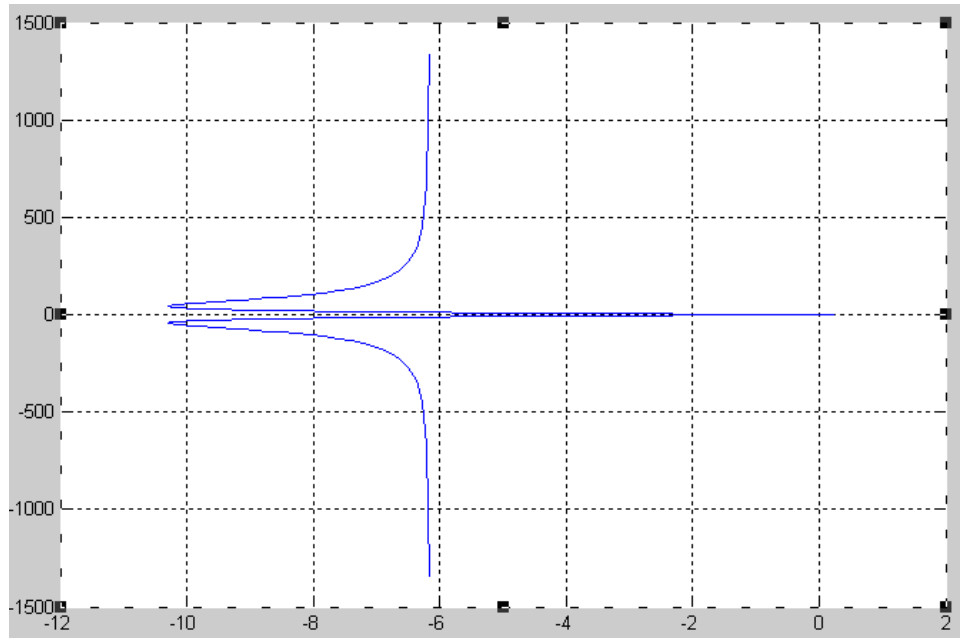


Рисунок 4.7 - АФЧХ розімкнutoї каскадної системи

Таким чином каскадна АСК є стійкою.

Застосування двої різних критеріїв стійкості (Михайлова та Найквіста) для аналізу розроблених АСК є методично обґрунтованим підходом, що значно підвищує достовірність отриманих результатів. Позитивні висновки щодо стійкості за всіма критеріями для обох розглянутих систем (одноконтурної та каскадної) свідчать про коректність розрахованих параметрів регуляторів у рамках прийнятої лінійної моделі об'єкта керування. Однак важливо пам'ятати, що реальний котлоагрегат є складним нелінійним об'єктом, параметри якого можуть змінюватися в процесі експлуатації (наприклад, через зміну навантаження, якості палива, зносу обладнання). Тому стійкість, доведена для лінеаризованої моделі в певній робочій точці, не гарантує абсолютної стійкості та оптимальної роботи системи в усьому діапазоні експлуатаційних режимів. Для більш глибокого

аналізу може знадобитися дослідження робастної стійкості (стійкості до варіацій параметрів об'єкта) та/або нелінійне моделювання поведінки системи.

#### 4.4 Оцінка якості процесів керування за перехідними характеристиками та інтегральними показниками

Після підтвердження стійкості розроблених систем автоматичного регулювання необхідно оцінити якість перехідних процесів, що виникають при типових збуреннях або зміні завдання. Основними показниками якості є перерегулювання, час регулювання, коливальність та статична помилка.

У роботі оцінка якості керування проводилася шляхом моделювання перехідних процесів в одноконтурній та каскадній АСР за допомогою програмного пакета MATLAB. На Рисунок 4.8 та Рисунок 4.9 представлені графіки перехідних характеристик для обох систем при одиничному ступінчастому впливі на вході.

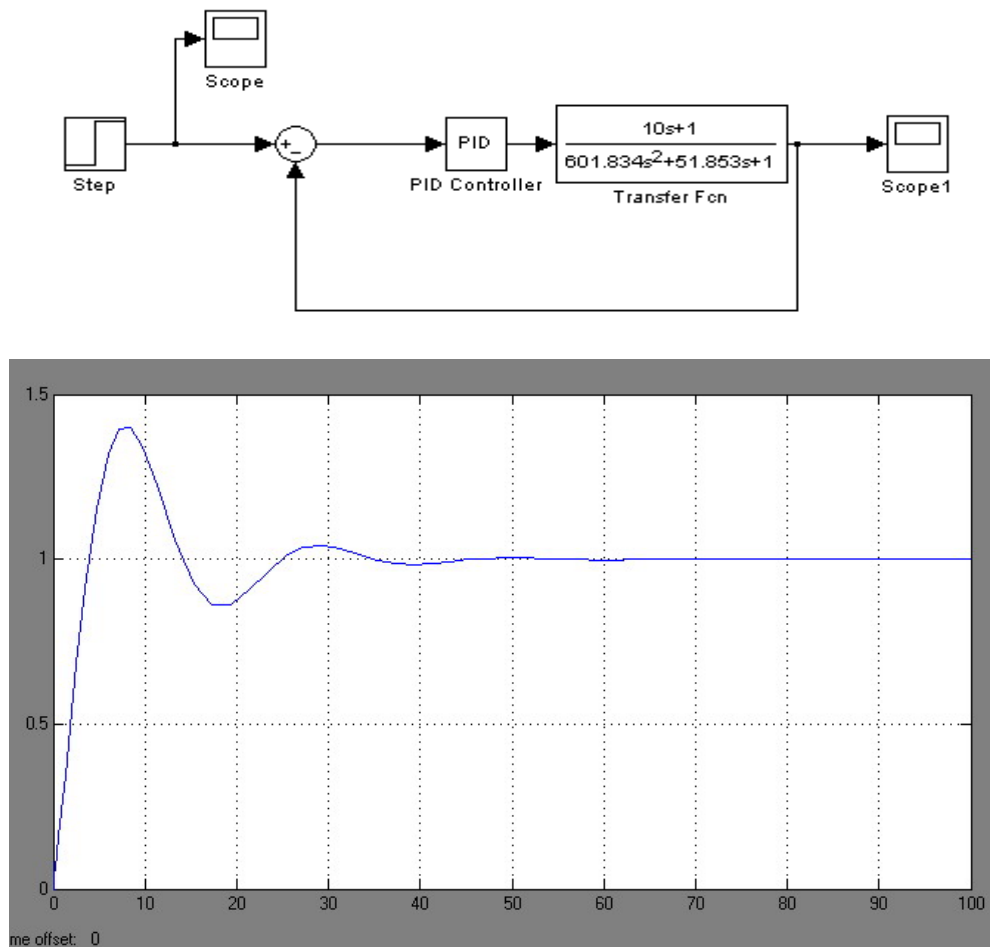


Рисунок 4.8 - Перехідна характеристика одноконтурної АСК

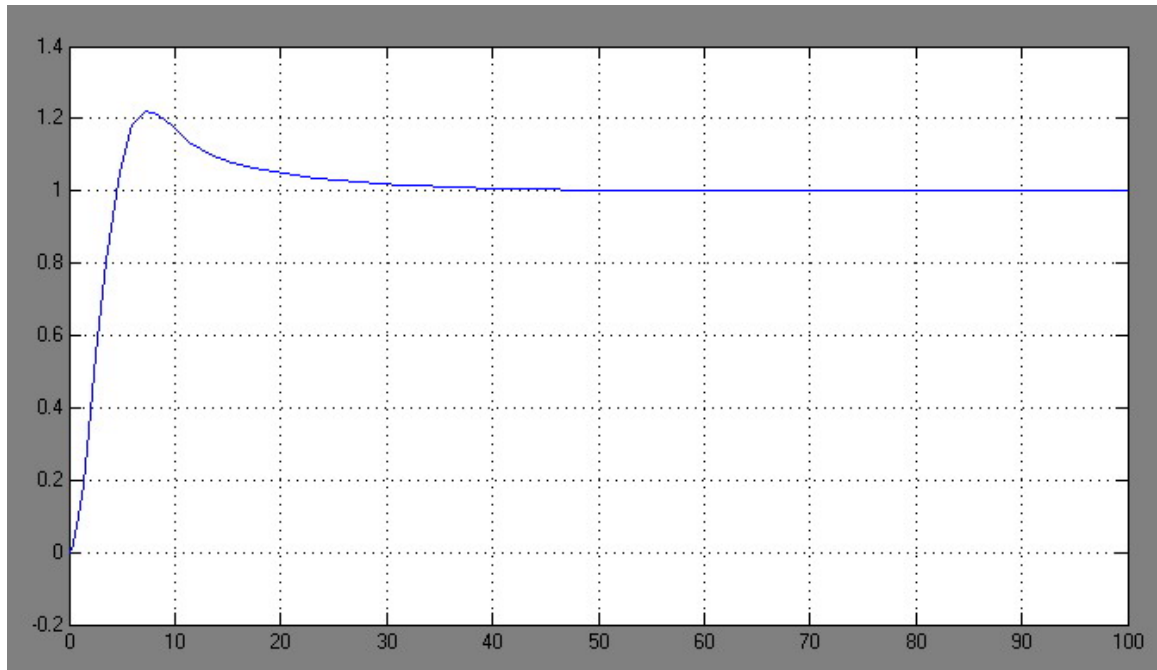
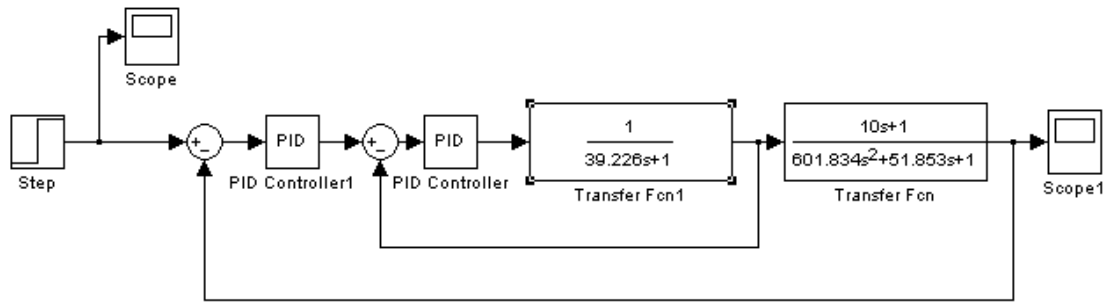


Рисунок 4.9 - Перехідна характеристика каскадної АСК

На основі отриманих графіків визначено такі показники якості :

1. Перерегулювання ( $\sigma$ ): Максимальне динамічне відхилення регульованої величини від її нового усталеного значення, виражене у відсотках.

$$\sigma = \frac{x(\infty) x_{\max} - x(\infty)}{x(\infty)} \cdot 100\%$$

- Для одноконтурної системи регулювання:  $\sigma = 11.18 - 1 \cdot 100\% = 18\%$
- Для каскадної системи регулювання:  $\sigma = 11.05 - 1 \cdot 100\% = 5\%$

2. Тривалість перехідного процесу ( $t_p$ ): Час, протягом якого регульована величина досягає нового усталеного значення з заданою точністю (зазвичай  $\pm 5\%$  відхилення від  $x(\infty)$ ).

- Для одноконтурної системи регулювання:  $t_p = 50$  с.
- Для каскадної системи регулювання:  $t_p = 40$  с.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Аналіз цих показників свідчить про суттєві переваги каскадної системи регулювання порівняно з одноконтурною для даного об'єкта керування. Каскадна АСР забезпечує значно менше перерегулювання (5% проти 18%) та швидший перехідний процес (40 с проти 50 с). Це підтверджує теоретичні переваги каскадного керування, зокрема його здатність ефективніше компенсувати внутрішні збурення та покращувати динаміку системи завдяки наявності швидкого внутрішнього контуру.

Для більш повної оцінки якості регулювання доцільно також розглянути інші показники:

- Час наростання ( $t_n$ ): Час, за який регульована величина досягає певного рівня (наприклад, 90%) від свого усталеного значення.
- Статична помилка ( $\epsilon_{ст}$ ): Відхилення регульованої величини від заданого значення в усталеному режимі. Для ПІ- та ПІД-регуляторів статична помилка при ступінчастому впливі теоретично дорівнює нулю.
- Коливальність: Характеризується кількістю коливань регульованої величини навколо усталеного значення до завершення перехідного процесу.
- Інтегральні критерії якості: Ці критерії дають узагальнену оцінку відхилення регульованої величини від заданого значення протягом усього перехідного процесу. Найбільш поширеними є:

Використання інтегральних критеріїв якості дозволяє формалізувати задачу оптимізації налаштувань регуляторів, наприклад, шляхом пошуку таких параметрів  $C_0, C_1$  (та  $C_2$  для ПІД), які мінімізують значення обраного інтегрального критерію. Це особливо актуально при застосуванні складних методик налаштування, таких як багатоцільова оптимізація, де необхідно знайти компроміс між різними аспектами якості регулювання (швидкодія, перерегулювання, робастність). Доповнення аналізу якості інтегральними критеріями дозволило б дати більш повну та об'єктивну кількісну оцінку ефективності розроблених АСК та обґрунтувати вибір оптимальних параметрів регуляторів.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

## Висновки до розділу

У даному розділі було здійснено синтез та комплексний аналіз одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування температурою перегрітої пари для котлоагрегату ТП-100. Розрахунок оптимальних параметрів налаштування ПІ-регулятора для одноконтурної АСР та ПІ- і ПІД-регуляторів для каскадної АСР проводився за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення на основі отриманих раніше передавальних функцій об'єкта керування.

Для оцінки стійкості розроблених систем було застосовано класичні критерії стійкості: Михайлова та Найквіста. Результати аналізу підтвердили стійкість як одноконтурної, так і каскадної АСК при розрахованих параметрах регуляторів у рамках лінійних моделей.

Оцінка якісних показників систем проводилася шляхом моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB. Аналіз перехідних характеристик показав, що каскадна система автоматичного регулювання має суттєві переваги порівняно з одноконтурною: менше значення перерегулювання (5% проти 18%) та коротшу тривалість перехідного процесу (40 с проти 50 с). Це свідчить про вищу ефективність каскадної схеми для керування інерційними об'єктами зі значними збуреннями, яким є пароперегрівач котлоагрегату.

Таким чином, результати синтезу та аналізу обґрунтовують доцільність застосування каскадної системи автоматичного регулювання для забезпечення високої точності та швидкодії при керуванні температурою перегрітої пари котлоагрегату ТП-100. Подальше вдосконалення якості керування може бути досягнуто шляхом застосування більш просунутих методик налаштування регуляторів, включаючи багатоцільову оптимізацію та адаптивні алгоритми, а також шляхом використання більш деталізованих нелінійних моделей об'єкта.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання даної роботи проведено всебічний аналіз котлоагрегату ТП-100 як складного об'єкта керування та розроблено підходи до синтезу системи автоматичного керування (АСК) його ключовими параметрами, зокрема температурою перегрітої пари. Визначено основні технологічні особливості, конструктивні характеристики, параметри сировини та палива, що впливають на експлуатаційні показники та динамічні властивості агрегату.

На основі аналізу сучасних науково-технічних джерел було суттєво доповнено та розширено вихідний матеріал, що стосується:

- Сучасних технологій експлуатації котлоагрегатів: Розглянуто альтернативні технології спалювання (ЦКШ), методи підготовки живильної води та палива, а також проблеми, пов'язані зі спалюванням вугілля марки "АШ", та шляхи їх вирішення.

- Еволюції систем керування: Проаналізовано розвиток АСК від традиційних ПД-регуляторів до сучасних DCS, інтелектуальних систем на базі AI/ML та IoT, а також актуальні стандарти автоматизації (IEC 61131-3, OPC UA, ISA-95).

- Методів моделювання та синтезу АСК: Розглянуто сучасне програмне забезпечення для моделювання динаміки ТЕС та передові методики налаштування регуляторів.

Ключові інсайти, отримані в ході роботи, підкреслюють, що котлоагрегат ТП-100, будучи представником технологій минулих десятиліть, має значний потенціал для модернізації з метою підвищення ефективності, гнучкості та відповідності сучасним екологічним вимогам. Використання вугілля "АШ" створює специфічні технологічні та екологічні виклики, що потребують впровадження передових технологій спалювання або ефективних систем очищення димових газів.

Синтез та аналіз одноконтурної та каскадної АСК температури перегрітої пари продемонстрував переваги каскадної схеми для даного типу об'єкта,

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

забезпечуючи кращі показники якості перехідних процесів. Підтверджено стійкість розроблених систем за допомогою класичних критеріїв.

Рекомендації щодо модернізації систем керування існуючих котлоагрегатів типу ТП-100:

1. Впровадження сучасних розподілених систем керування (DCS): Перехід на сучасні DCS-платформи дозволить інтегрувати керування всіма підсистемами котлоагрегату, покращити збір та аналіз даних, реалізувати складніші алгоритми керування та підвищити загальну надійність системи.

2. Модернізація польового рівня: Заміна застарілих датчиків на сучасні цифрові аналоги з вищою точністю та стабільністю; встановлення інтелектуальних виконавчих механізмів з функціями діагностики.

3. Оптимізація процесу горіння: Впровадження систем автоматичного регулювання співвідношення "паливо-повітря" на основі безперервного аналізу складу димових газів (вміст O<sub>2</sub>, CO). Розгляд можливості модернізації пальникових пристроїв для ефективнішого спалювання вугілля АШ та зниження викидів NO<sub>x</sub>.

4. Вдосконалення систем водопідготовки: Застосування сучасних методів очищення живильної води (зворотний осмос, комплексна іонообмінна обробка) для забезпечення її відповідності жорстким нормам для котлів високого тиску та запобігання відкладенням і корозії.

5. Застосування передових алгоритмів керування: Розробка та впровадження адаптивних регуляторів, систем на базі нечіткої логіки або елементів машинного навчання для оптимізації режимів роботи в умовах змінних навантажень та характеристик палива.

6. Інтеграція з системами моніторингу викидів та екологічного менеджменту: Забезпечення відповідності екологічним стандартам шляхом точного контролю викидів та ефективної роботи систем очищення димових газів.

7. Використання стандартів промислової автоматизації: Застосування стандартів IEC 61131-3 для програмування ПЛК та OPC UA для обміну даними забезпечить інтероперабельність та полегшить інтеграцію нових компонентів.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Кузнецов В. Г. Автоматизація та управління теплоенергетичними процесами. Київ: Вища школа, 2007.
2. Лащенко А. Б., Проценко А. В., Глушко М. В. Автоматизація теплоенергетичних установок. Харків: НТУ "ХПІ", 2013.
3. Іващенко А. А. Автоматизовані системи управління технологічними процесами. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
4. Коваленко А. А. Основи автоматизації виробничих процесів. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.
5. Бажан М. І., Будьонний О. Г. Теплоенергетичні установки та автоматизація теплових процесів. Київ: Університет "Україна", 2011.

					БР.АКП-14.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

# ДОДАТКИ

## Додаток А

### Перехідні характеристики

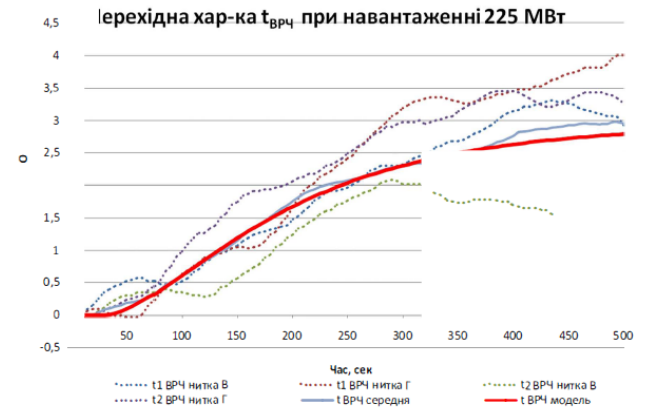
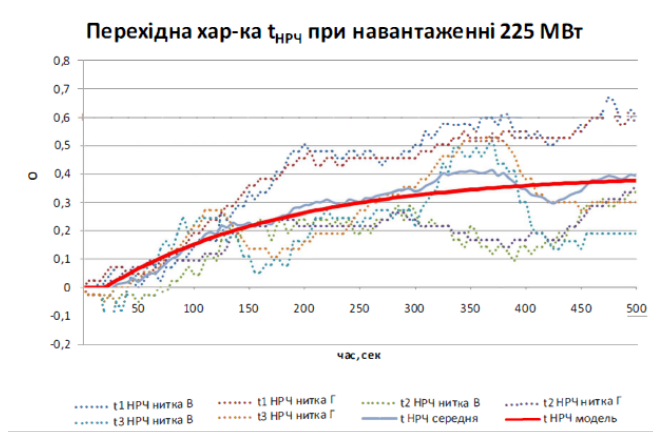


Табл. Значення параметрів моделі

Назва параметру	Порядок моделі об'єкта	Параметри моделі об'єкта	Розмірність	Навантаження енергоблоку, МВт	
				225	300
Температура пари НРЧ, °С	1	коєф. передачі К	°С/т/год	0,4	0,2
		постійна часу Т	с	168	475
		запінювання $\tau$	с	19	11
		коєф. передачі К	°С/т/год	2,95	1,1
Температура пари ВРЧ, °С	2	постійна часу Т <sub>2</sub>	с	140	150
		постійна часу Т <sub>1</sub>	с	50	145
		запінювання $\tau$	с	26	14

- Температура пари НРЧ:

$$W_{\text{НРЧ}} = \frac{k_{\text{НРЧ}}}{T_{\text{НРЧ}} s + 1} e^{-\tau_{\text{НРЧ}} s}$$

де  $k_{\text{НРЧ}} = [0,2 \dots 0,4]$ ,  $T_{\text{НРЧ}} = [475 \dots 168]$ ,  $\tau_{\text{НРЧ}} = [11 \dots 19]$ .

- Температура пари ВРЧ:

$$W_{\text{ВРЧ}} = \frac{k_{\text{ВРЧ}}}{(T_2^{\text{ВРЧ}} s + 1)(T_1^{\text{ВРЧ}} s + 1)} e^{-\tau_{\text{ВРЧ}} s}$$

де  $k_{\text{ВРЧ}} = [1,1 \dots 2,95]$ ,  $T_2^{\text{ВРЧ}} = [150 \dots 140]$ ,  $T_1^{\text{ВРЧ}} = [145 \dots 50]$ ,  $\tau_{\text{ВРЧ}} = [14 \dots 26]$ .

## Додаток Б

### Програмне забезпечення системи моделювання

```
*
* Local switches:
* - define
SLMSG_USE_STD_MEMCPY to
allow use of standard
memcpy/memset
* implementations - otherwise
local implementations are used
* - define
SLMSG_USE_EXCEPTION to
allow run-time exceptions
* - define
SLMSG_ALLOW_SYSTEM_ALLO
C to include malloc/free code
* note that this also turns on
SLMSG_USE_EXCEPTION
*/

#ifndef SL_INTERNAL

# include <string.h>
# define
SLMSG_MEMCPY(dst,src,nbytes)
(memcpy(dst,src,nbytes))
# define
SLMSG_MEMSET(dst,val,nbytes)
(memset(dst,val,nbytes))
# include "simstruct/sl_types_def.h"
# include "sl_messages/slMsgSvc.h"

extern void
_slmsg_instrument_send(slMessage
*msg, slMsgQueueId queueId, const
void *obj);
extern void
_slmsg_instrument_drop(slMessage
*msg, slMsgQueueId queueId, const
void *obj);
extern void
_slmsg_instrument_pop(slMessage
*msg, slMsgQueueId queueId, const
void *obj);

#else

/* Where to get "memcpy" and
"memset" implementations from
* Define
SLMSG_USE_STD_MEMCPY to
use standard memcpy/memset
implementations
* otherwise local implementations
are used
*/
# ifdef
SLMSG_USE_STD_MEMCPY
# include <string.h>
# define
SLMSG_MEMCPY(dst,src,nbytes)
(memcpy(dst,src,nbytes))
# define
SLMSG_MEMSET(dst,val,nbytes)
(memset(dst,val,nbytes))
# else
void
_slmsg_memcpy_impl(void *dst,
const void *src, unsigned long
nbytes);
void
_slmsg_memset_impl(void *dst, int
val, unsigned long nbytes);
# define
SLMSG_MEMCPY(dst,src,nbytes)
(_slmsg_memcpy_impl(dst,src,nbyt
es))
# define
SLMSG_MEMSET(dst,val,nbytes)
(_slmsg_memset_impl(dst,val,nbyte
s))
# endif

# ifndef SLMSG_UNIT_TEST
# include
"builtin_typeid_types.h"
# else
# include
"simstruct/sl_types_def.h"
# endif

# endif
# include "slMsgSvc.h"
# if
defined(SLMSG_ALLOW_SYSTEM
_ALLOC) ||
defined(SLMSG_USE_EXCEPTION
)
# define
SLMSG_USE_EXCEPTION
# else
# define __slmsg_assert(e)
# define __slmsg_RAISE(e)
# define
_slmsg_Mem_Failed_Address
NULL
# define
_slmsg_SYSTEM_ALLOC(s)
NULL
# define
_slmsg_SYSTEM_FREE(p)
# endif

/* Stub out unused functions */
# define
_slmsg_instrument_send(a,b,c)
# define
_slmsg_instrument_drop(a,b,c)
# define
_slmsg_instrument_pop(a,b,c)

#endif

#if defined(SL_INTERNAL) ||
defined(MATLAB_MEX_FILE)
# ifndef
SLMSG_INCLUDE_TASK_TRANS
ITION_QUEUE
# define
SLMSG_INCLUDE_TASK_TRANS
ITION_QUEUE
# endif
#endif
```

```

#endif
#define
__SLMSG_USE_MEMORY_POOL
S__
#ifdef
__SLMSG_USE_MEMORY_POOL
S__
# define
__slmsg_POOLED_ALLOC(pool,
nbytes)
__slmsg_MemPool_Alloc(pool,
nbytes)
# define
__slmsg_POOLED_FREE(pool, ptr)
__slmsg_MemPool_Free (pool, ptr)
#else
# define
__slmsg_POOLED_ALLOC(pool,
nbytes)
__slmsg_Mem_alloc((nbytes),
__FILE__, __LINE__)
# define
__slmsg_POOLED_FREE(pool, ptr)
((void)(__slmsg_Mem_free((ptr),
__FILE__, __LINE__), (ptr) = 0))
#endif

#define
SLMSG_CIRCULAR_INDEX(index
, capacity) \
((capacity) == 0) ? (index) :
((index) % (capacity))

#define MSG_POOL_SIZE_MAX
(slMsgPoolSize)(-1)
#define
MSG_POOL_MAX_CHUNK_SIZE
(67108864) /*64MB*/

#ifdef
SLMSG_USE_STD_MEMCPY

/* -----
*
Utility functions
*/

/* -----
*
*/

#endif

/* -----
*
*/

/* Internal memcpy implementation
*/
void __slmsg_memcpy_impl(void
*dst, const void *src, unsigned long
nbytes)
{
    unsigned long idx;
    int8_T *dst8 = (int8_T *)dst;
    const int8_T *src8 = (const int8_T
*)src;
    for (idx = 0; idx < nbytes; ++idx) {
        *dst8++ = *src8++;
    }
}

/* Internal memset implementation */
void __slmsg_memset_impl(void
*dst, int val, unsigned long nbytes)
{
    unsigned long idx;
    int8_T *dst8 = (int8_T *)dst;
    for (idx = 0; idx < nbytes; ++idx) {
        *dst8++ = (int8_T) val;
    }
}

#endif /*
SLMSG_USE_EXCEPTION */

#ifdef
SLMSG_ALLOW_SYSTEM_ALLO
C

/* -----
*
Dynamic memory
management
*/

/* -----
*
*/

#include "stdlib.h"
#include "stddef.h"

/* function declaration - C99 standard
*/
void
__slmsg_Mem_alloc(slMsgPoolSize
nbytes, const char_T *file, int_T
a_line);

```

```

void
*_slmsg_Mem_malloc(slMsgPoolSize
count, slMsgPoolSize nbytes, const
char_T *file, int_T a_line);
void __slmsg_Mem_free(void *ptr,
const char_T *file, int_T a_line);
void *_slmsg_Mem_resize(void
*ptr, slMsgPoolSize nbytes, const
char_T *file, int_T a_line);

void
*_slmsg_Mem_alloc(slMsgPoolSize
nbytes, const char_T *file, int_T
a_line)
{
    void *ptr;
    __slmsg_assert(nbytes > 0);
    ptr = malloc(nbytes);
    if (ptr == NULL) {

        __slmsg_Except_raise(__slmsg_Except_Bad_Alloc, file, a_line);
    }
    return ptr;
}

void
*_slmsg_Mem_malloc(slMsgPoolSize
count, slMsgPoolSize nbytes, const
char_T *file, int_T a_line)
{
    void *ptr;
    ptr = calloc(count, nbytes);
    if (ptr == NULL) {

        __slmsg_Except_raise(__slmsg_Except_Bad_Alloc, file, a_line);
    }
    return ptr;
}

void __slmsg_Mem_free(void *ptr,
const char_T *file, int_T a_line)
{
    (void) (a_line);
    (void) (file);
    if (ptr) {
        free(ptr);
    }
}

void *_slmsg_Mem_resize(void
*ptr, slMsgPoolSize nbytes, const
char_T *file, int_T a_line)
{
    __slmsg_assert(ptr != NULL);
    __slmsg_assert(nbytes > 0);
    ptr = realloc(ptr, nbytes);
    if (ptr == NULL) {

        __slmsg_Except_raise(__slmsg_Except_Bad_Alloc, file, a_line);
    }

    return ptr;
}

#endif /*
SLMSG_ALLOW_SYSTEM_ALLO
C */

/* -----
-----
*           Memory Pooling for
Messages
* -----
----- */

#ifdef
SLMSG_MEMPOOL_INSTRUMENT
#include <stdio.h>
#endif

/* function declaration - C99 standard
*/
void
__slmsg_MemPool_Add(__slmsg_MemPool *pool,
ulong_T numUnits,
ulong_T unitSize, void *memBlock);
void*
__slmsg_MemPool_Alloc(__slmsg_MemPool* pool,
ulong_T nbytes);
void
__slmsg_private_MemPool_Free(__slmsg_MemPool *pool,
void **ptrIn);
void
__slmsg_MemPool_Free(__slmsg_MemPoolMgr *mgr,
void *ptr);
void
__slmsg_private_MemChunk_Destroy(__slmsg_MemChunk **chunk,
boolean_T mallocStatus);
void
__slmsg_private_MemPool_Destroy(__slmsg_MemPool *pool);
void
__slmsg_MemPool_Destroy(__slmsg_MemPoolMgr *mgr);

/* Add a new fixed-size memory pool
to the memory manager
* Pool will have numUnits number
of memory units, each of size
unitSize
*
* This will allocate memory from the
system for the pool and create two
* double linked lists for allocated
blocks and free blocks
*/
void
__slmsg_MemPool_Add(__slmsg_MemPool *pool,
                    ulong_T numUnits,
                    ulong_T unitSize,
                    void *memBlock)
{
    unsigned long idx;
    const slMsgPoolSize unitNodeSize
= (slMsgPoolSize)unitSize +
sizeof(__slmsg_PoolListNode);
    __slmsg_MemChunk *chunk =
pool->fMemChunk;
    __slmsg_assert(pool != NULL);
    chunk->fNumUnits = numUnits;
    __slmsg_assert((slMsgPoolSize)num

```

```

Units < (MSG_POOL_SIZE_MAX /
unitNodeSize));
    chunk->fBlockSize =
(slMsgPoolSize)numUnits *
unitNodeSize;
    if (chunk->fBlockSize >
MSG_POOL_MAX_CHUNK_SIZE)
        chunk->fBlockSize =
MSG_POOL_MAX_CHUNK_SIZE;
    chunk->fPrevChunk = NULL;

    /* If memory block is provided
then use it */
#ifdef
SLMSG_ALLOW_SYSTEM_ALLO
C
    __slmsg_assert(memBlock !=
NULL);
    chunk->fMemBlock = memBlock;
#else
    if (memBlock != NULL) {
        chunk->fMemBlock =
memBlock;
    } else {
        __slmsg_assert(pool-
>fCanMalloc);
        chunk->fMemBlock =
__slmsg_SYSTEM_ALLOC(chunk-
>fBlockSize);
        __slmsg_assert(chunk-
>fMemBlock != NULL);
    }
#endif

    /* Attach chunk to pool */
    pool->fUnitSize = unitSize;

    /* Initialize pool properties */
    pool->fAllocListHead = NULL;
    pool->fFreeListHead = NULL;
    pool->fNextPool = NULL;
    pool->fStatNumAlloc = 0;
    pool->fStatNumFree = 0;

    /* Link all of the memory units and
create the free list */
    for (idx = 0; idx < numUnits;
++idx) {
        __slmsg_PoolListNode
*pCurUnit = (__slmsg_PoolListNode
*)
            ((char *)chunk->fMemBlock
+ idx * unitNodeSize);

        pCurUnit->pPrev = NULL;
        pCurUnit->pNext = pool-
>fFreeListHead; /* Insert the new
unit at head */

        if (NULL != pool-
>fFreeListHead) {
            pool->fFreeListHead->pPrev
= pCurUnit;
        }
        pool->fFreeListHead =
pCurUnit;
    }

    /* Allocate memory of specified size
from the pool
*
* Get the next available block from
the free list and return. If no more
* blocks are left then currently we
allocate from the system. We should
* ideally expand the available
memory and then allocate (grow the
pool).
*/
void
__slmsg_MemPool_Alloc(__slmsg_
MemPool* pool, ulong_T nbytes)
{
    __slmsg_PoolListNode *pCurUnit;
    __slmsg_assert(pool != NULL);

    /* If pool is fully allocated:
* - first preference is to grow the
pool memory, if allowed
* - if not, then we have to do an
system allocation, if allowed
* - if not, then we raise an
exception
*/
    if (NULL == pool-
>fFreeListHead) {
#ifdef
SLMSG_ALLOW_SYSTEM_ALLO
C
        if (pool->fCanMalloc) { /*
Grow the memory pool */
            unsigned long idx;

            /* Allocate double the number
of units this time */
            slMsgPoolSize
newBlockSize;
            ulong_T curNumUnits =
pool->fMemChunk->fNumUnits;
            ulong_T newNumUnits = 2 *
curNumUnits;
            const slMsgPoolSize
unitNodeSize =
(slMsgPoolSize)pool->fUnitSize +
sizeof(__slmsg_PoolListNode);

            __slmsg_assert((slMsgPoolSize)new
NumUnits <
MSG_POOL_SIZE_MAX /
unitNodeSize);
            newBlockSize =
newNumUnits * unitNodeSize;
            if (newBlockSize >
MSG_POOL_MAX_CHUNK_SIZE)
                newBlockSize =
MSG_POOL_MAX_CHUNK_SIZE;

            /* If the new block size after
growing will exceed the maximum
* allowed block size, then do
a system allocation instead
*/
            if (newBlockSize > pool-
>fMaxBlockSize) {
                return
__slmsg_SYSTEM_ALLOC(nbytes);
            } else {

```

```

        /* Allocate another chunk
*/
        __slmsg_MemChunk
*chunk = (__slmsg_MemChunk *)
        __slmsg_SYSTEM_ALLOC(sizeof(
__slmsg_MemChunk));
        __slmsg_assert(chunk !=
NULL);

        chunk->fNumUnits =
newNumUnits;
        chunk->fBlockSize =
newBlockSize;
        chunk->fMemBlock =
__slmsg_SYSTEM_ALLOC(chunk-
>fBlockSize);
        __slmsg_assert(chunk-
>fMemBlock != NULL);

        /* Link up the new chunk
with the previous one */
        chunk->fPrevChunk =
pool->fMemChunk;
        pool->fMemChunk =
chunk;

        /* Link all of the memory
units and create the free list */
        for (idx = 0; idx <
newNumUnits; ++idx) {
            __slmsg_PoolListNode
*pCUnit = (__slmsg_PoolListNode
*)
                ((char *)chunk-
>fMemBlock + idx * unitNodeSize);

            pCUnit->pPrev = NULL;
            pCUnit->pNext = pool-
>fFreeListHead; /* Insert the new
unit at head */

            if (NULL != pool-
>fFreeListHead) {
                pool->fFreeListHead-
>pPrev = pCUnit;
            }

            pool->fFreeListHead =
pCUnit;
        }
        } else {
#endif
            (void) nbytes;
            /* Raise a memory allocation
exception */
            __slmsg_RAISE(__slmsg_Except_B
ad_Alloc);
#ifdef
SLMSG_ALLOW_SYSTEM_ALLO
C
        }
#endif
        }

        /* If we reached here then the free
list is not empty */
        pCurUnit = pool->fFreeListHead;
        pool->fFreeListHead = pCurUnit-
>pNext; /* Next unit from free list */
        if (NULL != pool->fFreeListHead)
        {
            pool->fFreeListHead->pPrev =
NULL;
        }

        pCurUnit->pNext = pool-
>fAllocListHead;
        if (NULL != pool-
>fAllocListHead) {
            pool->fAllocListHead->pPrev =
pCurUnit;
        }
        pool->fAllocListHead = pCurUnit;
        pool->fStatNumAlloc++;
        return (void *) ( (char *)pCurUnit +
sizeof(__slmsg_PoolListNode) );
    }

    /* Free previously allocated memory
and return to the pool
*/
}

        * Determine if this pointer was
allocated from any of the chunks in
        * this pool. If yes, then return it to
the pool and reset the input
        * pointer so that the caller knows the
memory was released.
        *
        * If the memory is not from this
pool, return silently.
        */
void
__slmsg_private_MemPool_Free(__s
lmsg_MemPool *pool, void **ptrIn)
{
    int8_T memFromPool = 0;
    void *ptr = *ptrIn;
    __slmsg_MemChunk *chunk =
pool->fMemChunk;

    /* Determine whether this memory
was allocated from the pool or
        * from the system - check each
memory chunk
        */
    do {
        memFromPool = (
            (chunk->fMemBlock < ptr)
            &&
            (ptr < (void *)((char *)chunk-
>fMemBlock + chunk-
>fBlockSize)));
        chunk = chunk->fPrevChunk;
    } while (!memFromPool &&
(chunk != NULL));

    /* Return memory to the pool if it
was allocated from the pool */
    if (memFromPool) {
        __slmsg_PoolListNode
*pCUnit = (__slmsg_PoolListNode
*)
            ((char *) ptr -
            sizeof(__slmsg_PoolListNode));
    }
}

```

```

pool->fAllocListHead =
pCurUnit->pNext;
if (NULL != pool-
>fAllocListHead) {
    pool->fAllocListHead->pPrev
= NULL;
}

pCurUnit->pNext = pool-
>fFreeListHead;
if (NULL != pool-
>fFreeListHead) {
    pool->fFreeListHead->pPrev
= pCurUnit;
}

pool->fFreeListHead =
pCurUnit;
pool->fStatNumFree++;

/* Reset the pointer since we
have "freed" this memory */
*ptrIn = NULL;
}
}

/* Free previously allocated memory
and return to the pool
*
* Starting from the first pool, ask
each pool to free this memory if
* it belongs to the pool. If no pool
frees it, then it must have been
* a system allocation and it can be
freed by a system call.
*/

void
__slmsg_MemPool_Free(__slmsg_M
emPoolMgr *mgr, void *ptr)
{
    int i;

    /* Ask each pool to free the
memory
    * The pool that frees it will set the
pointer to NULL
    */
    for (i = 0; (i < mgr->fNumPools)
&& ptr != NULL; ++i) {
        __slmsg_private_MemPool_Free(
&(mgr->fPools[i]), &ptr);
    }

#ifdef
SLMSG_ALLOW_SYSTEM_ALLO
C
    if (mallocStatus) {
        __slmsg_private_MemPool_Free(
&(mgr->fPools[0]), &ptr);
    }
#endif
}

/* If still not freed by any pool then
do a system free
because the memory is not
associated with any memory
pool and memory was system
allocated */
if (ptr != NULL) {
    __slmsg_SYSTEM_FREE(ptr);
}
#endif
}

/* Recursively destroy all memory
chunks starting from input chunk
*/

void
__slmsg_private_MemChunk_Destro
y(__slmsg_MemChunk **chunk,
boolean_T
mallocStatus)
{
    if ((*chunk)->fPrevChunk !=
NULL) {
        __slmsg_private_MemChunk_Destro
y(&(*chunk)->fPrevChunk,
mallocStatus);
    }

#ifdef
SLMSG_ALLOW_SYSTEM_ALLO
C
    if (mallocStatus) {
        __slmsg_SYSTEM_FREE((*chunk)-
>fMemBlock);
    }
}

__slmsg_SYSTEM_FREE(*chunk);
}

#endif
*chunk = NULL;
}

/* Recursively destroy all memory
pools starting from the input pool
* Destroy all memory chunks owned
by the input pool
*/
#endif
}

```