

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота
на здобуття
другого (магістерського) рівня вищої освіти

ТЕМА РОБОТИ

«Система автоматизованого керування температурним режимом котельного обладнання»

Здобувача вищої освіти
Гневуш Віталій Сергійович
Освітня програма
**«Автоматизоване управління
технологічними процесами»**
(Спеціальність 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка»)

_____ (підпис)

Науковий керівник:
к.т.н., доцент Ківа І.Л.

_____ (підпис)

Національна шкала _____
Кількість балів _____
Оцінка: ECTS _____

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій
другий (магістерський) рівень вищої освіти
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри

«_____» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гневуша Віталія Сергійовича

1. Тема роботи: Система автоматизованого керування температурним режимом котельного обладнання

керівник роботи: к.т.н., доцент Ківа Ігор Леонідович

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
від «02» 10 2025 р. № 116-ОД_____

2. Строк подання студентом роботи:

3. Вихідні дані до роботи: живильна вода має температуру 274 °С, температура вторинної та гострої пари на рівні 550 °С, зміни параметрів об'єкта керування повинні бути на рівні тридцяти відсотків від номінального значення, зменшення динамічного відхилення не менше десяти відсотків, скорочення часу керування до двадцяти відсотків.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Вступ. Аналіз систем автоматичного управління тепловими агрегатами. Аналіз та дослідження системи автоматичного регулювання температури пари. Технічна реалізація автоматизованої системи контролю та регулювання температури пари. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу: графічний матеріал виконаний у вигляді мультимедійної презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Ківа І.Л., доцент		
Розділ 2	Ківа І.Л., доцент		
Розділ 3	Ківа І.Л., доцент		
Розділ 4	Ківа І.Л., доцент		

7. Дата видачі завдання 12.09.2025 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Заключний документ етапу
1	Вибір теми магістерської роботи, призначення керівника	до 12.09.2025	Затвердження переліку тем магістерських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану магістерської роботи	до 21.10.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми магістерського дослідження	до 21.10.2025	Текст вступу
4	Написання тексту магістерської роботи відповідно до її структури:	21.10.2025– 02.12.2025	Текст розділів
4.1	I розділ	21.10.2025– 28.10.2025	Текст розділу
4.2	II розділ	28.10.2024– 4.11.2025	Текст розділу
4.3	III розділ	4.11.2025– 11.11.2025	Текст розділу
4.4	IV розділ	11.11.2025– 18.11.2025	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	18.11.2025– 21.11.2025	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	21.11.2025– 25.11.2025	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист магістерської роботи	25.11.2025 – 09.12.2025	Магістерська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування магістерської роботи	09.12.2025 – 15.12.2025	Магістерська робота
9	Реєстрація магістерських робіт на кафедрі	до 15.12.2025	Магістерська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист магістерської роботи	.12.2025 – .12.2025	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

АНОТАЦІЯ

Гневуш В.С. : Система автоматизованого керування температурним режимом котельного обладнання. – Рукопис.

Кваліфікаційна магістерська робота за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2025 рік.

Магістерська дипломна робота присвячена підвищенню ефективності функціонування системи автоматичного регулювання температури в умовах частих змін параметрів роботи технологічного обладнання.

Аналіз роботи теплового обладнання як об'єкта автоматичного регулювання температури засвідчив істотний вплив технологічних змінних на динаміку температурних коливань. На цій основі обґрунтовано необхідність удосконалення системи автоматичного керування температурою для забезпечення потрібних показників якості в умовах змінних режимів роботи теплового обладнання.

За результатами проведених досліджень запропоновано використати додатковий канал корекції, який підвищує якість роботи системи автоматичного регулювання температури теплового обладнання в перехідних режимах. Визначено параметри оптимального налаштування регулятора температури, необхідні для забезпечення достатнього запасу стійкості роботи системи керування температурним режимом. Запропонована апаратно-технічна реалізація розробленої методики налаштування параметрів регулятора у вигляді програмних продуктів на базі промислових контролерів, яка дозволяє забезпечити виконання вимог дотримання режимів технологічного процесу.

Ключові слова: система автоматичного керування температурою, параметри системи автоматичного керування; стійкість та якість системи автоматичного керування.

ABSTRACT

Gnevush V.S.: System of automated temperature control of boiler equipment. – Manuscript.

Qualification master's thesis in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadsky Tavrichesky National University, Kyiv, 2025.

Master's thesis is devoted to increasing the efficiency of the automatic temperature control system in conditions of frequent changes in the parameters of technological equipment.

Analysis of the operation of thermal equipment as an object of automatic temperature control has shown a significant influence of technological variables on the dynamics of temperature fluctuations. On this basis, the need to improve the automatic temperature control system to ensure the required quality indicators in conditions of variable operating modes of thermal equipment is substantiated.

According to the results of the conducted research, it is proposed to use an additional correction channel, which increases the quality of the automatic temperature control system of thermal equipment in transient modes. The parameters of the optimal adjustment of the temperature controller, necessary to ensure a sufficient margin of stability of the temperature control system, are determined. The hardware and technical implementation of the developed method of adjusting the controller parameters in the form of software products based on industrial controllers is proposed, which allows to ensure the fulfillment of the requirements for compliance with the technological process modes.

Keywords: automatic temperature control system, parameters of the automatic control system; stability and quality of the automatic control system.

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМИ АГРЕГАТАМИ.....	11
1.1. Аналіз чинників ускладнення роботи систем автоматичного керування тепловими агрегатами	11
1.2. Вимоги до систем автоматичного керування тепловим агрегатом	18
1.3. Аналіз способів покращення якості роботи систем автоматичного керування тепловими агрегатами	20
1.4. Інтеграція динамічних характеристик об'єкта у процес формування керуючих сигналів	28
Висновки до розділу 1	31
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПАРИ	32
2.1 Дослідження системи автоматичного регулювання температури пари на основі моделі об'єкта	32
2.2. Синтез каскадної системи автоматичного керування з використанням моделі об'єкта в структурі регулятора	35
2.3 Модифікація каскадної системи керування для стабілізації температури пари	45
2.4. Порівняльний аналіз системи автоматичного керування температурою пари з наявними системами.....	49
Висновки до розділу 2.....	61
РОЗДІЛ 3 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПАРИ.....	62
3.1. Структура системи автоматичного регулювання температури пари.....	62
3.2. Програмно-алгоритмічний модуль системи автоматизованого регулювання температури пари	69
Висновки до розділу 3	81
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА	

В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	82
Вступ	82
4.1. Науково-методичні засади аналізу виробничого середовища теплоенергетичних систем	84
4.2. Класифікація небезпечних та шкідливих чинників	85
4.3. Інженерно-технічні та організаційні засади охорони праці	86
4.4. Екологічна безпека теплоенергетичних об'єктів.....	88
4.5. Запобігання надзвичайних ситуацій на теплоенергетичних об'єктах.....	90
Висновки до розділу 4	93
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	96

ВСТУП

Актуальність теми. Одним із ключових завдань підвищення ефективності сучасного виробництва є створення та впровадження новітніх автоматичних і автоматизованих систем керування технологічними процесами. Сучасна промисловість потребує зростання надійності та економічності, а також активного використання енергозберігаючих технологій. Для України це є стратегічно важливим і пріоритетним напрямом розвитку промислового сектору. Керування теплоенергетичними об'єктами потребує врахування їхніх специфічних особливостей, що відрізняють їх від інших типів об'єктів автоматичного регулювання. Серед них — суттєві зміни параметрів у широкому діапазоні залежно від режимів роботи й часу, виражена нелінійність, вплив значної кількості технологічних чинників на режими функціонування, а також характерна для теплових систем висока інерційність.

Теплоенергетичні об'єкти включають енергетичні агрегати, системи опалення, промислові печі та інші установки. Одним із найпоширеніших типів таких об'єктів є прямоточний тепловий агрегат. Його робота супроводжується частими та значними змінами навантаження, тобто функціонуванням у нестационарних режимах, а також дією різноманітних збурень. Котлоагрегати можуть живитися різними теплоносіями, що мають відмінні фізико-хімічні та енергетичні характеристики. Крім того, як і для більшості теплових систем, для них властива значна інерційність, а також суттєві запізнення в інформаційних каналах.

Практичний досвід експлуатації показує, що штатні системи автоматичного керування, які входять до комплекту теплового агрегату, часто працюють незадовільно за умов значних збурень і особливо в нестационарних режимах. У таких випадках керовані параметри можуть виходити за межі, встановлені технологічними регламентами, що створює ризик виникнення аварійних ситуацій. Недосконалість вбудованих регуляторів призводить до відхилень технологічних параметрів, насамперед температури пари, що може

спричиняти нештатні режими роботи, а іноді — спрацювання аварійного захисту і повну зупинку агрегату.

Тому дотримання вимог технологічних регламентів потребує впровадження сучасних систем автоматичного керування, здатних забезпечити стабільність і надійність функціонування теплових агрегатів у змінних умовах. Таким чином, важливим завданням є створення сучасних систем автоматичного керування, які забезпечують точне дотримання технологічних регламентів, зокрема контролю температури пари, під час роботи теплових агрегатів у нестационарних режимах.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської дипломної роботи є підвищення ефективності функціонування систем автоматичного керування температурою пари теплових агрегатів при змінних режимах роботи.

Для досягнення цієї мети у роботі були поставлені та вирішувалися такі завдання:

- проведення аналізу впливу режимів роботи теплового агрегату на його динамічні властивості;
- удосконалення методики визначення параметрів моделі об'єкта автоматичного керування на основі аналізу початкової ділянки перехідного процесу теплового агрегату;
- дослідження структурних та алгоритмічних рішень для забезпечення ефективної роботи системи автоматичного керування парою у змінних режимах роботи агрегату;
- вдосконалення багатоконтурної адаптивної системи автоматичного керування температурою пари.

Об'єкт дослідження - система автоматичного керування тепловим агрегатом.

Предмет дослідження - система автоматичного керування температурою пари теплового агрегату при роботі у нестационарних режимах.

Методи дослідження. У процесі виконання магістерської дипломної роботи використовувалися методи теорії автоматичного керування, зокрема передатні функції у безперервній та дискретній формах, а також комп'ютерне моделювання, оптимальний параметричний синтез і чисельні методи для розв'язання диференціальних рівнянь.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Запропоновано використання регуляторів із внутрішньою моделлю та продемонстровано їхні переваги, які проявляються у підвищенні якості роботи та стабілізації температури пари в нестационарних режимах теплових агрегатів.
- Удосконалено систему автоматичного керування температурою пари шляхом застосування регулятора з двома ступенями свободи, що забезпечує стабілізацію температури при змінних режимах роботи агрегату та враховує динаміку внутрішнього контуру при формуванні керуючого впливу основного регулятора.

Практичне значення отриманих результатів:

- Розроблено рекомендації щодо впровадження системи автоматичного керування температурою пари теплового агрегату.
- Удосконалено алгоритми керування тепловим агрегатом із застосуванням регуляторів у складі локальних систем автоматичного керування, що значно підвищує його ефективність.
- Запропоновано методику врахування навантаження теплового агрегату під час роботи системи автоматичного керування, що забезпечує підвищення ефективності функціонування агрегату в нестационарних режимах.

Апробація роботи. Гневуш В.С., Ківа І.Л. Система автоматизованого керування температурним режимом котельного обладнання. *Практичні питання функціонування і відновлення об'єктів муніципальної інфраструктури та промисловості України в сучасних умовах: збірник матеріалів III всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Київ, 04 грудня 2025 року) / упоряд. Гуйда О.Г., Вишемірська Я.С. К: ТНУ імені В. І. Вернадського, 2025.*

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМИ АГРЕГАТАМИ

1.1. Аналіз чинників ускладнення роботи систем автоматичного керування тепловими агрегатами

Схему технологічного процесу перетворення енергії в тепловому агрегаті можна представити у вигляді, зображеному на рис. 1.1. Водо-паровий тракт, у якому вода перетворюється на пару, складається з трьох послідовно з'єднаних частин поверхонь нагріву [4,14,15]. У загальному вигляді його можна розділити на водяну, водо-парову та парову секції. Вода, проходячи послідовно через водяний економайзер 1, нижній 2 та верхній 3 теплообмінники, а також через пароперегрівачі 4 і 5, перетворюється на перегріту пару заданої температури. Після проходження турбіни пара повертається до теплового агрегату для додаткового нагріву у пароперегрівачі вторинної пари 6. Межа між випарувальною та нагрівальною частинами агрегату може змінюватися залежно від витрати пари, необхідної кількості теплової енергії та витрати води.

Одним із ключових завдань при експлуатації теплового агрегату є підтримання балансу між виробленою та спожитою енергією з урахуванням втрат. Процеси вироблення теплової енергії в агрегаті залежать від кількості речовини у потоках води та теплоносія. Відповідно, основне завдання автоматичного керування технологічним процесом теплового агрегату полягає у забезпеченні підтримки матеріального та енергетичного балансів.

При підтримці цих балансів тепловий агрегат працює в стаціонарному режимі, який характеризується постійністю у часі тиску та температури пари, витрат води та інших параметрів роботи агрегату. Перехідні режими виникають при порушенні стаціонарного стану, що може бути спричинено різними зовнішніми або внутрішніми збурюючими впливами. У таких умовах матеріальний та енергетичний баланси порушуються, що впливає на стабільність роботи агрегату.

При зміні режиму роботи змінюються всі або окремі параметри теплового агрегату. У таких випадках система автоматичного керування повинна здійснити необхідні впливи для якнайшвидшого відновлення матеріального та енергетичного балансів. Керування роботою агрегату під час порушень сталого режиму здійснюється шляхом впливу на відповідні керуючі органи і може виконуватись як вручну, так і за допомогою спеціалізованих систем автоматичного керування [25].

Необхідний рівень автоматизації теплового агрегату типу ТПП – 210 А (основні технічні характеристики наведені в таблиці 1.1) по основних каналах автоматичного керування показано на принциповій технологічній схемі (рис. 1.1). Автоматичний регулятор Р1 призначений для регулювання теплового навантаження агрегату. Інформація про поточне навантаження подається на вхід регулятора від засобу вимірювання витрати води Дж.в. У разі відхилення витрати води від заданого значення регулятор через виконавчий механізм впливає на клапан подачі води, відновлюючи встановлену величину витрати.

В якості основного сигналу для автоматичного регулятора Р2 температурного режиму теплового агрегату використовується температура у проміжній точці водо-парового тракту. Регулятор призначений для підтримання стабільного температурного режиму шляхом регулювання подачі палива в топку, що, у свою чергу, визначає кількість теплоти, витраченої на утворення пари.

Таблиця 1.1

Основні технічні характеристики теплового агрегату типу ТПП-210А

Найменування параметра	Розмірність	Значення
Номінальна електрична потужність	МВт	300
Номінальна продуктивність	т/год	950
ККД (брутто)	%	91
Температура первинної перегрітої пари	°С	545
Тиск перегрітої пари	МПа	25.5
Температура вторинної пари	°С	545

Тиск вторинної пари	МПа	4
Витрата палива	т/год	120
Температура живильної води	°С	260
Температура р.с. за економайзером	°С	301
Температура р.с. за радіаційною частиною	°С	464
Температура гарячого повітря	°С	390
Температура димових газів перед ширмами	°С	1190
Температура димових газів за пароперегрів.	°С	598
Температура димових газів за економайзером	°С	431
Температура димових газів за радіан. частиною	°С	131
Кількість корпусів	шт.	2
Кількість пальників	шт.	12
Основне паливо	АШ (антрацитовий штиб)	
Водяний об'єм котла	м ³	54
Паровий об'єм по первинному тракту	м ³	97

Регулятор Р3 призначений для автоматичного підтримання розрідження в топці (Рт). У разі відхилення розрідження від заданого значення регулятор Р3 змінює продуктивність димососа, що дозволяє регулювати кількість димових газів, видалених із топки, тобто забезпечує відповідність між утвореною в топці кількістю газів та їхнім відведенням.

Регулятор Р4 відповідає за підтримання заданого співвідношення «паливо – повітря». Для визначення оптимальності цього співвідношення використовується вміст кисню (O₂) у вихідних газах. При відхиленні співвідношення від оптимального рівня змінюється концентрація кисню в димових газах, і регулятор Р4, впливаючи на роботу вентилятора, коригує подачу повітря в топку, відновлюючи оптимальне співвідношення «паливо – повітря» в тепловому агрегаті.

пароперегрівач має значну довжину, для покращення динамічних характеристик його поділяють на дві або три самостійно керовані ділянки.

Окрім основних контурів керування, у системах автоматичного керування тепловим агрегатом формуються додаткові локальні контури та місцеві зворотні зв'язки для підвищення якості управління.

Автоматизація тепловим агрегатом як об'єкта керування є складним завданням, оскільки контури взаємно впливають один на одного всередині агрегату. Зміна будь-якого керуючого впливу призводить до зміни всіх параметрів тепловим агрегатом, що свідчить про наявність перехресних зв'язків. Особливо тісно пов'язані між собою контури автоматичного керування тепловим навантаженням котла, розрідженням у топці та співвідношенням «паливо–повітря». У таких умовах доцільно розглядати їх як єдину систему автоматичного керування тепловим навантаженням і процесом спалювання теплоносія [4,11].

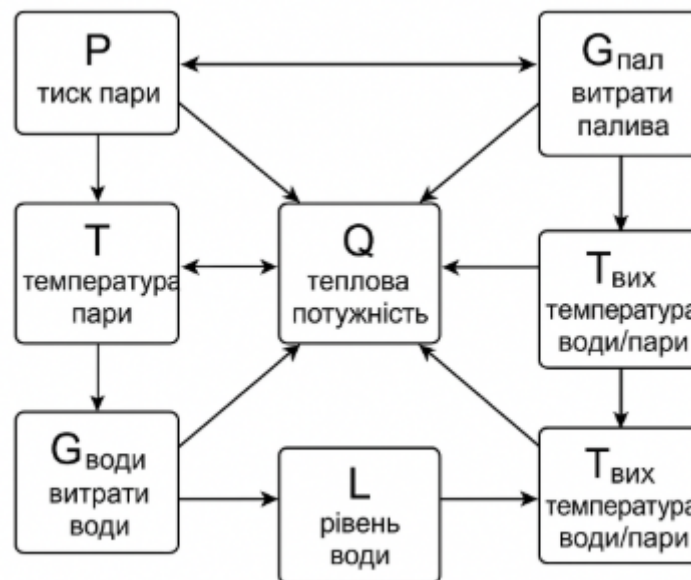


Рис 1.2 Схема взаємозв'язків параметрів тепловим агрегатом

Основні параметри : $D_{впр}$ - витрата води на впорскування; $D_{ж.в.}$ - витрата води; $B_{п}$ - витрата палива; $Q_{п}$ - витрата повітря; $Q_{г}$ - витрата димових газів; $D_{в.п.}$ - витрата вторинної пари; $t_{п.п.}$ - температура первинної пари; $D_{п.п.}$ - витрата первинної пари; $P_{п.п.}$ - тиск первинної пари; $t_{пп}$ - температура в проміжній точці водо-парового тракту; O_2 - вміст кисню у димових газах; P_T - розрідження в топці; $t_{в.п.}$ - температура вторинної пари.

Основні завдання автоматизації теплового агрегату як об'єкта автоматичного керування включають: автоматичне регулювання подачі води до котла, автоматичне керування тепловим навантаженням і процесом горіння, а також автоматичне регулювання температури перегрітої пари. При розробці та налаштуванні цих систем необхідно враховувати взаємний вплив технологічних параметрів. Тому при визначенні параметрів однієї системи автоматичного керування слід розглядати вплив інших систем як зовнішні дії, на які конкретна система повинна реагувати для підтримання необхідного значення керованої величини.

Керування температурою перегрітої пари є складною і водночас важливою задачею, оскільки її необхідно стабілізувати на всій протяжності теплового тракту. Нагрівальна частина агрегату складається з послідовно розташованих поверхонь нагріву в різних ділянках тракту. Разом з обладнанням для впорскування охолоджувальної води, з'єднувальними трубопроводами та паровими колекторами вона утворює повноцінний об'єкт автоматичного керування.

Найпоширенішим методом регулювання температури перегрітої пари є використання змішувального пароохолоджувача, принцип дії якого полягає у впорскуванні знесоленої води в потік перегрітої пари. Поточна температура пари передається на регулятор, який у разі необхідності змінює витрату води на впорскування. Особливістю динамічних характеристик пароперегрівача є наявність запізнення зміни температури на виході після виникнення збурення. Щоб мінімізувати негативний вплив цього запізнення, зазвичай застосовують

двохімпульсну схему, де основним сигналом є температура перегрітої пари після ділянки нагріву, а випереджувальним — температура пари після зони вприску води.

Основними видами збурень пароперегрівача теплового агрегату є:

- зміна температури або вологості пари на вході в пароперегрівач;
- зміна температури або кількості топкових газів;
- зміна витрати пари через пароперегрівач;
- зміна навантаження теплового агрегату.

Для керування температурою перегрітої пари застосовуються одноконтурні та двоконтурні системи автоматичного керування, які забезпечують задовільну якість регулювання в сталих режимах, для яких і проектувалися теплові агрегати. При цьому оптимальні параметри налаштування регулятора температури перегрітої пари значно змінюються залежно від навантаження агрегату: при зниженні навантаження вдвічі коефіцієнт підсилення зменшується приблизно в 1,25 рази, а постійна часу — у 4 рази [4,17]. Якщо ж зберегти налаштування регулятора, оптимальні для повного навантаження, то при 50% навантаженні можливе виникнення автоколивань у системі.

При значних коливаннях навантаження та роботі в нестаціонарних режимах власні системи автоматичного керування температурою перегрітої пари часто не справляються зі своїми завданнями. У таких умовах коливання температури металу блоків теплового агрегату можуть досягати ± 20 °C і більше, що негативно впливає на довговічність труб пароперегрівача [18] (рис. 1.3). Основними причинами цього є неточності математичних моделей пароперегрівача як об'єкта автоматичного керування, складність налаштування регуляторів багатоконтурних систем, а також значні зміни параметрів теплового агрегату під час нестаціонарних режимів.

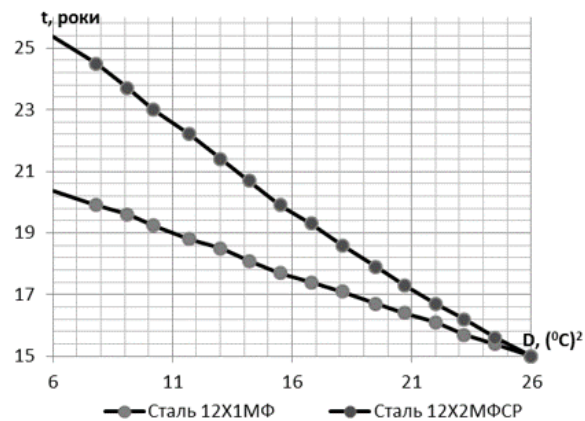


Рис. 1.3 Залежність строку служби металу пароперегрівача від зміни температури первинної пари

Тому розробка та впровадження більш досконалих систем автоматичного керування температурою пари на існуючих теплових агрегатах, здатних підтримувати температуру перегрітої пари в заданих межах навіть при нестационарних режимах роботи, залишається актуальним завданням.

1.2. Вимоги до систем автоматичного керування тепловим агрегатом

У стаціонарних режимах роботи необхідно підтримувати матеріальний та енергетичний баланси теплового агрегату [21, 25, 27]. Система автоматичного керування технологічним процесом повинна забезпечувати надійну та стабільну роботу агрегату як у сталих, так і в перехідних режимах в усьому діапазоні навантажень — від 60 до 100 % номінальної потужності.

До основних технологічних параметрів, які мають підтримуватися на рівнях, встановлених технологічними регламентами, належать:

- температура первинної та вторинної пари;
- теплове навантаження (потужність) агрегату;
- температурний режим роботи агрегату;
- розрідження в топці котла;
- співвідношення «паливо/повітря» у топковому просторі.

Для забезпечення безпечної та довговічної роботи теплового агрегату необхідно підтримувати температуру перегрітої пари в межах допустимих

значень. Зниження температури може спричинити суттєві механічні пошкодження турбіни, тоді як різке її перевищення призводить до нерівномірного нагріву елементів турбіни, зменшення зазорів між лопатками та корпусом і, як наслідок, до можливих механічних дефектів чи аварійних ситуацій.

Перевищення допустимих відхилень температурних показників уздовж водо-теплового тракту призводить до порушення температурного режиму роботи теплового агрегату. Це негативно позначається на стані теплообмінних труб, погіршуючи фізико-механічні властивості металу трубопроводів і теплообмінників. У результаті можуть виникати аварійні ситуації та скорочуватися міжремонтні інтервали експлуатації агрегату.

Стабільність розрідження в топці теплового агрегату визначає матеріальний баланс топкового простору — рівновагу між кількістю димових газів, що відводяться з топки, та обсягом газів, які утворюються в процесі згоряння палива.

Окрім виконання вимог, спрямованих на забезпечення надійності роботи теплового агрегату, важливо гарантувати й економічну ефективність його функціонування. Найсуттєвіший вплив на економічність має режим роботи топки, тобто правильна організація процесу згоряння палива.

До основних вимог щодо роботи систем автоматичного керування тепловим агрегатом належать:

1. Забезпечення допустимого діапазону відхилень температури перегрітої пари — від +5 до -10 °С.
2. Підтримання стабільного температурного режиму теплового агрегату протягом усього періоду його експлуатації.
3. Забезпечення економічного режиму функціонування теплового агрегату.
4. Мінімізація коливань температури пари та скорочення тривалості нестационарних процесів у агрегаті завдяки роботі системи автоматичного керування.

Потреба у високій точності регулювання технологічних параметрів з метою підтримання надійної та економічної роботи теплового агрегату зумовлює необхідність використання систем автоматичного керування, насамперед — систем керування температурою пари.

1.3. Аналіз способів покращення якості роботи систем автоматичного керування тепловими агрегатами

Сучасні підвищені вимоги до якості систем автоматичного керування, зниження впливу зовнішніх збурень, транспортних і перехідних запізень, а також прагнення спростити процес налаштування таких систем спричинили появу широкого спектра модифікованих ПД-алгоритмів і відповідних регуляторів, а також нових структур керування.

Високі показники якості роботи систем автоматичного керування можуть бути досягнуті шляхом використання принципу розімкненого керування [11, 14], тоді як зворотний зв'язок застосовується переважно для подальшого зменшення похибки. Сутність розімкненого підходу в ПД-регуляторах полягає у поділі задачі їх проектування та використання на дві складові. Перша складова — забезпечення робастності та зменшення впливу шумів і зовнішніх збурень — реалізується шляхом коректного вибору та налаштування параметрів ПД-регулятора. Друга - забезпечення необхідної якості перехідного процесу - вирішується за допомогою застосування регулятору з прямим зв'язком.

Регулятори, які забезпечують можливість незалежного вирішення цих двох частин мають назву «регуляторів з двома ступенями свободи». Структура ПД-регулятора, якій застосовує принцип розімкненого керування, показана на рис. 1.4,в. Регулятор $W_p(s)$ спроектований як в системі з класичним ПД-регулятором, а передатні функції блоків M_u та M_y обрані такими, щоб покращити реакцію системи автоматичного керування на вхідний вплив $y_3(t)$. Зміна сигналу $y_3(t)$ надходить на вхід об'єкта управління через блок M_u , обминаючи ланцюг зворотного зв'язку. Передатна функція блоку M_u

вибирається такою, щоб вихідний сигнал системи $y(t)$ точно відповідав вхідному сигналу, $y_3(t) = y(t)$, щоб сигнал похибки керування дорівнював нулю. Оскільки в реальній системі при дії зовнішніх збурень або зміні уставки $\varepsilon(t) \neq 0$, то тоді вступає в дію звичайний ПД-регулятор $W_P(s)$, який за допомогою зворотного зв'язку зводить цю похибку до нуля.

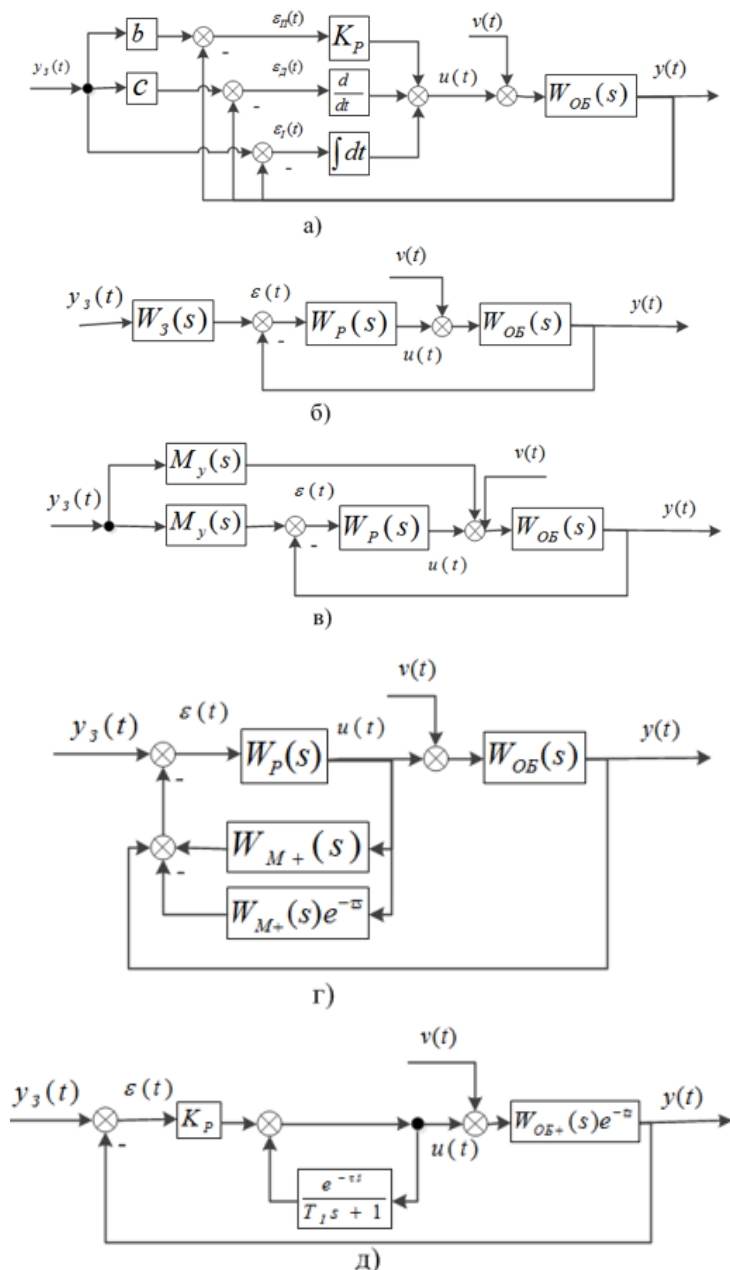


Рис. 1.4 Варіанти побудови автоматичних регуляторів:

а - ПД-регулятор з ваговими коефіцієнтами; б - ПД-регулятор з виділеним блоком $W_3(s)$; в - регулятор з комбінуванням принципів розімкненого

керування та зворотного зв'язку; г - предиктор; д - предиктивний ПП-регулятор.

Основна концепція використання систем із нечіткою логікою полягає у впровадженні «експертного досвіду» (оператора чи особи, що приймає рішення) в схему керування технологічним процесом. У таких системах взаємозв'язок між входовими та вихідними сигналами складних технологічних об'єктів описується набором правил нечіткої логіки по типу IF–THEN, що дозволяють застосовувати лінгвістичні змінні замість складної динамічної моделі об'єкта керування. Використання лінгвістичних змінних, правил і принципів нечіткої логіки, а також наближених міркувань дає змогу інтегрувати експертні знання в роботу системи керування.

Типова структура систем із нечіткою логікою містить чотири основні компоненти: вхідний перетворювач чітких змінних у нечіткі через блок фазифікації, базу нечітких правил, блок логічного нечіткого висновку та вихідний перетворювач нечітких значень у чіткі через блок дефазифікації. Якщо вихід блоку дефазифікації не використовується як безпосередній керуючий вплив на об'єкт керування, то така система виконує функцію прийняття рішень на основі нечіткої логіки.

Системи автоматичного керування, у яких параметри, структура або керуючі дії автоматично змінюються на основі поточної інформації про стан об'єкта з метою досягнення оптимального режиму роботи за початкової невизначеності та змінних умов, називаються адаптивними системами.

Головна відмінність класичних регуляторів зі зворотним зв'язком від адаптивних полягає в тому, що класичні регулятори використовують фіксований зворотний зв'язок для компенсації збурень та коригування стану об'єкта керування. Такий зворотний зв'язок підсилює чи іншим чином обробляє похибку керування, яка є різницею між заданим і фактичним значенням вихідної величини, і цей підхід є типовим для традиційних систем.

В адаптивних системах принцип роботи змінюється: обробка похибки регулювання коригується відповідно до невідомих або мінливих умов, тобто

закон керування адаптується до параметрів об'єкта та зовнішніх впливів. Це забезпечує розширення діапазону ситуацій, у яких система може підтримувати високу якість керування. Адаптацію можна розглядати як зворотний зв'язок вищого рівня, за якого параметри регулятора змінюються відповідно до змін у поведінці чи характеристиках об'єкта керування.

На сьогодні існує значна кількість підходів до класифікації адаптивних систем автоматичного керування [31,33]. Вони розрізняються за методами адаптації, структурними особливостями, способом впливу на об'єкт керування, а також за реалізацією адаптивних властивостей. У джерелі [2] запропоновано класифікацію адаптивних систем відповідно до підходів, що використовуються для формування механізму адаптації. Цей варіант класифікації представлено на рис. 1.5. Згідно з ним адаптивні системи автоматичного керування, побудовані на евристичних методах, самоналагоджуваних регуляторах та системах з еталонною моделлю, утворюють три головні напрями адаптивного керування.

Методи, що базуються на евристичному підході, забезпечують адаптивність шляхом прямої оцінки вихідної змінної (або похибки регулювання) чи визначеного для системи критерію якості. У таких системах часто застосовують цифрові ПДД-регулятори. Важливо, що їх робота не вимагає проведення ідентифікації параметрів системи автоматичного керування. Під час синтезу регуляторів цього типу зазвичай прагнуть оптимізувати критерій, який характеризує якість перебігу технологічного процесу. Водночас на практиці такий підхід не завжди дає можливість досягти високої точності роботи системи. Прикладом успішного застосування подібних регуляторів є регулятор, запропонований Åström та Hägglund [27].

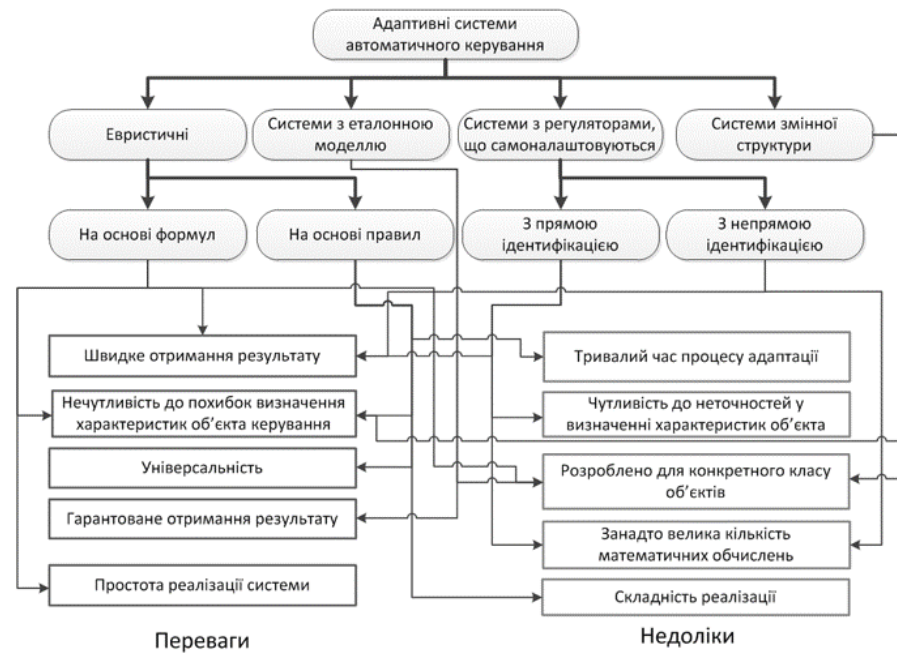


Рис. 1.5 Класифікація адаптивних систем автоматичного керування

Питання розроблення адаптивних систем автоматичного керування з еталонною моделлю детально висвітлені у численних наукових дослідженнях [36–38]. Використання еталонної моделі дає змогу формувати бажану реакцію або необхідний вектор станів на заданий керуючий вплив. Такий підхід базується на аналізі різниці між вихідними сигналами реальної системи автоматичного керування та еталонної моделі. Метою адаптації є приведення статичних і динамічних характеристик замкненої системи до характеристик моделі. Фактично адаптивна система постійно порівнює поведінку контуру керування з бажаною та формує похибку, яку необхідно мінімізувати.

Завдання системи автоматичного керування полягає у зменшенні розбіжності між еталонною моделлю та реальною системою. Це забезпечується коригуванням параметрів регулятора або формуванням відповідного вхідного сигналу. Важливою особливістю таких систем є їх подвійна функція: вони можуть застосовуватися як для ідентифікації параметрів технологічного процесу, так і для забезпечення потрібних режимів роботи системи автоматичного керування. Водночас їх використання обмежується тим, що такі системи ефективні лише для детермінованих об'єктів.

Підхід, заснований на самоналагодженні регуляторів, передбачає поетапне визначення характеристик системи та збурень, а також проведення відповідних розрахунків під час спостереження за змінами в роботі об'єкта. Використовуючи отримані дані, можна обрати оптимальний метод синтезу регулятора. Регулятори, які спочатку ідентифікують невідомі властивості процесу, а потім виконують синтез системи керування (тобто реалізують адаптивне керування з рекурсивною ідентифікацією), називають самоналагоджуваними [37].

Динамічні параметри теплового агрегату та контуру перегріву пари змінюються постійно як у процесі експлуатації, так і при зміні навантаження. Крім того, алгоритми роботи систем автоматичного керування, розроблені на основі математичної моделі об'єкта на стадії проектування, зазвичай значно відрізняються від дійсно оптимальних, особливо щодо числових значень параметрів налаштування. Тому систему автоматичного керування тепловим агрегатом можна віднести до класу систем із неповною початковою інформацією про об'єкт. Для ефективного керування такими об'єктами доцільно застосовувати адаптивні системи [20,33,38].

У більшості випадків адаптація системи автоматичного керування здійснюється через ідентифікацію об'єкта. При цьому вона повинна проводитися із застосуванням активного експерименту, який передбачає введення додаткових збурень (сигнальних, структурних, алгоритмічних тощо) [31,32]. Незважаючи на певні успіхи пасивних методів ідентифікації [2,20] та створених на їх основі систем автоматичного керування, їх широкому впровадженню перешкоджають такі фактори: необхідність тривалого часу спостереження за об'єктом, обробка значно більшого обсягу даних порівняно з активними методами та сильний вплив неконтрольованих збурень на кінцевий результат [31,32].

У останній час значного поширення набули методи налаштування регуляторів, що базуються на частотному представленні моделей систем автоматичного керування [23,36]. Використовуючи взаємозв'язок між

коливальністю перехідного процесу та величиною резонансу модуля комплексної частотної характеристики системи, а також виходячи з вимог до заданої коливальності та періоду коливань перехідної характеристики, можна перевести ці умови у вимоги до значення резонансного піку та резонансної частоти. Під час налаштування на вхід системи подають синусоїдальні коливання від спеціального генератора. Оскільки резонансна частота заздалегідь невідома, процес налаштування потребує ітераційної процедури, під час якої змінюються як параметри регулятора, так і частота поданих коливань.

Промислові контролери [29,38] адаптуються до характеристик об'єкта керування за допомогою частотної релейної ідентифікації. Процес ідентифікації починається у період відсутності перехідних процесів в об'єкті керування. Під час експерименту ПІД-регулятор відключається, а на вхід об'єкта подаються тестові сигнали через реле, що викликають коливання контрольованої змінної. Коли на виході системи встановлюються коливання з постійною амплітудою та частотою, отримані дані обробляють методами гармонійної лінеаризації, а результати використовують для налаштування ПІД-регулятора, який відразу починає працювати. У деяких випадках релейна ідентифікація є попереднім етапом налаштування системи та потребує подальшого уточнення параметрів регулятора [37,38].

Технологія AccuTune компанії Honeywell [32] реалізує адаптивні регулятори через попередню ідентифікацію в розімкненому контурі та подальше налаштування параметрів регулятора відповідно до набору правил і аналітичних залежностей. У цих регуляторах застосовані модифіковані ПІД-алгоритми, а ідентифікація об'єкта проводиться за реакцією на ступінчате збурення. Вибір моделі при цьому визначається за поведінкою похідної керованої величини.

При налаштуванні двоконтурних систем регулювання (каскадних або з випереджаючим сигналом) на етапі ідентифікації об'єкта застосовують різні зміни структури системи керування. Зокрема, розмикають зовнішній контур,

подають додаткові сигнали на вхід регулятора або відключають диференціатор [25]. Такі втручання можуть погіршувати якість роботи системи та спотворювати динамічні характеристики досліджуваних об'єктів.

Вирішити проблему корекції якості керування під час експлуатації можна за допомогою методів налаштування регуляторів за перехідними характеристиками замкненої системи [14,17]. Для цього необхідно забезпечити сталість зовнішніх впливів та стаціонарність системи, що на практиці не завжди можливо. Крім того, такий підхід може призводити до отримання неточних результатів. Зазвичай процедура налаштування проводиться ітераційно.

На сьогодні накопичено значний досвід експлуатації експертних систем, прикладом яких є «EXACT Controller» компанії Foxboro [36]. Цей регулятор може автоматично налаштовуватися залежно від форми перехідного процесу системи. Він використовує метод розпізнавання моделей, тобто аналізує поведінку системи під час перехідного процесу для корекції параметрів керування.

Регулятор SuvoCon [38] практично застосовується у нейронних мережах в процесах автоматичного керування. Його алгоритм формує набір коефіцієнтів підсилення або вагових коефіцієнтів, які потім використовуються як параметри закону керування. Алгоритм збільшує вагові коефіцієнти, що показали високу ефективність у мінімізації похибки. Вагові фактори оновлюються на кожному інтервалі дискретизації, враховуючи ефекти останніх дій регулятора та зміни властивостей процесу.

Недоліком більшості серійних промислових регуляторів є обмежена доступність інформації про принципи побудови алгоритмів керування через комерційну закритість систем або складність їх впровадження на іншому технологічному обладнанні. Це ускладнює використання таких систем при створенні нових ефективних систем автоматичного керування.

У роботі [25] описана адаптивна система керування температурою первинної пари енергоблоку потужністю 800 МВт, яка реалізована на основі

каскадної схеми регулювання. Особливістю цієї системи є застосування двох ПІ-регуляторів у каскадній структурі, на відміну від традиційних схем, що використовують регулятор і диференціатор. Параметри налаштування внутрішнього контуру встановлюються близькими до граничних значень завдяки невеликій інерційності цього контуру. Параметри зовнішнього контуру визначаються через адаптивний контур, який генерує тестові гармонійні сигнали, що подаються як завдання для коригуючого регулятора. Обчислювальний комплекс, за допомогою відповідних перетворювачів, формує складові пробного сигналу, після чого аналізується реакція системи для визначення оптимальних налаштувань автоматичного керування згідно з запропонованою методикою.

1.4. Інтеграція динамічних характеристик об'єкта у процес формування керуючих сигналів

Для керування об'єктами з великим транспортним запізненням, до яких належать теплові агрегати, застосовуються спеціальні структури ПІД-регуляторів, що включають блоки передбачення поведінки об'єкта – предиктори. Предиктор дозволяє оцінювати майбутню реакцію системи на керуючі впливи, що значно підвищує точність регулювання та стабільність процесу. Однією з найпоширеніших таких структур є відомий предиктор Сміта, який використовується для компенсації ефекту транспортного запізнення в системах автоматичного керування.

Для передбачення можливо застосовувати модель об'єкта керування, яка складається з дрібно-раціональної частини $W_{M+}(s)$ та транспортної затримки $e^{-\tau}$. Завдяки тому, що з моделі можна виключити затримку, є принципова можливість передбачення поведінки об'єкта до появи сигналу на його виході. Такій підхід базується на структурі, де $W_p(s)$ - звичайний ПІД-регулятор, $W_{OB}(s) = W_{OB+}(s) \cdot e^{-\tau}$ - передатна характеристика об'єкту керування.

Така структура включає додатковий внутрішній контур зворотного зв'язку з модельним блоком, що містить аналітичну модель об'єкта керування із запізненням, а також модель об'єкта без запізнення. Додатковий контур формує сигнал, який ідентичний очікуваному вихідному сигналу системи, і подає його на вхід регулятора до моменту надходження сигналу від головного ланцюга зворотного зв'язку. По мірі наростання сигналу з головного контуру, вихідний сигнал модельного блоку поступово зменшується.

ППІ-регулятор є модифікацією предиктора Сміта і поширений значно ширше, ніж сам предиктор Сміта. Проте обидва ці регулятори виконують лише керування об'єктом і мають обмежену здатність послаблювати вплив зовнішніх збурень, що негативно впливає на ефективність автоматичного керування.

Наразі значна увага приділяється методам автоматичного керування, що базуються на модельному прогнозуючому підході. Основна ідея таких алгоритмів полягає у формулюванні задачі проектування регулятора як задачі оптимізації в реальному часі з урахуванням заданих обмежень керування [30,36,37]. До основних переваг модельного прогнозуючого керування належать: можливість ефективного управління багатовимірними та багатозв'язними об'єктами зі складною структурою з урахуванням їхньої нелінійності та здатність проводити оптимізацію у режимі реального часу.

Якщо модель об'єкта керування може бути ідентифікована, то застосування регулятора з внутрішньою моделлю дозволяє уникнути процедури ручного налаштування системи керування [29,31].

Принцип керування із внутрішньою моделлю ґрунтується на тому, що автоматичне регулювання буде ефективним тоді, коли система в певній мірі враховує особливості об'єкта керування. Тобто, якщо регулююча підсистема містить модель об'єкта, теоретично можлива ідеальна якість керування, що проявляється у відсутності перерегулювання та коливань перехідного процесу, а також у мінімальному часі регулювання.

Ідентифікація моделі об'єкта та її інтеграція до складу регулятора забезпечує формування необхідної реакції системи на зміну завдання, одночасно підтримуючи керування об'єктом із заданими показниками якості. Типова схема системи автоматичного керування з внутрішньою моделлю наведена на рис. 1.6.

Аналіз, проведений у роботі [16], показав, що введення моделі об'єкта до регулятора забезпечує високу якість реакції на зміну завдання без виникнення статичної похибки.

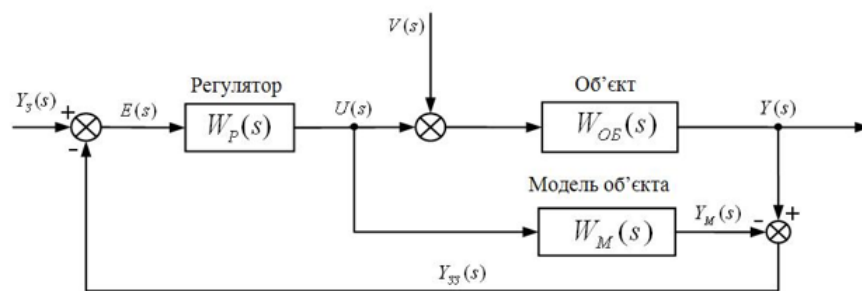


Рис. 1.6 Структурна схема системи автоматичного керування та внутрішньою моделлю

Проведений аналіз системи автоматичного керування (рис. 1.6) показав, що за умови достатньої точності визначення моделі об'єкта система здатна забезпечувати високий рівень якості керування. Це проявляється у стабільній та швидкій реакції на зміну завдання, а також у значному зниженні впливу зовнішніх збурень на процес автоматичного регулювання, що підвищує ефективність і надійність роботи системи.

Висновки до розділу 1

1. Основними технологічними параметрами, що визначають ефективність роботи теплового агрегату, є параметри перегрітої пари, які необхідно підтримувати в жорстко заданих межах відповідно до технологічних регламентів, особливо у нестаціонарних режимах роботи. Тому розробка системи автоматичного керування температурою пари є актуальним завданням.

2. Огляд існуючих систем регулювання температури пари теплового агрегату показав, що для забезпечення ефективного керування необхідно використовувати систему автоматичного регулювання, здатну виконувати автоматичне налаштування своїх параметрів.

3. Для підвищення ефективності роботи системи автоматичного керування доцільно застосовувати підходи, що базуються на використанні сучасних структур регуляторів, зокрема регулятора з внутрішньою моделлю, доповненого адаптивними властивостями.

4. Структура системи автоматичного керування температурою пари повинна бути двоконтурною. Для підвищення ефективності налаштування такої системи необхідно враховувати взаємодію та особливості функціонування вимірювальних каналів і вплив на поведінку системи.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПАРИ

2.1 Дослідження системи автоматичного регулювання температури пари на основі моделі об'єкта

Застосування принципу структурно-параметричної оптимізації зі зворотним зв'язком у побудові систем автоматичного керування передбачає, що регулятор повинен мати динамічну ланку з передатною функцією, рівною або близькою до оберненої передатної функції об'єкта керування [11]. У зв'язку з цим доцільним при синтезі системи автоматичного регулювання температури пари є використання регулятора з внутрішньою моделлю [28].

Такий регулятор містить модель об'єкта керування безпосередньо в структурі регулятора, що дозволяє автоматично визначати його параметри з високими показниками якості керування. Іншими словами, якщо система автоматичного керування включає модель об'єкта, теоретично можлива досягти ідеальної якості регулювання, яка характеризується відсутністю перерегулювання та коливальності перехідного процесу, а також мінімальним часом керування.

За результатами ідентифікації контуру виробництва пари котла теплового агрегату типу ТПП-210А встановлено [21], що об'єкт керування можна описати як послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого порядку та ланки з транспортним запізненням, що має наступний вигляд (2.1):

$$W_{OB}(s) = \frac{K_{OB} \cdot e^{-\tau_{OB}s}}{T_{OB}s + 1} \quad (2.1)$$

На початку роботи системи автоматичного керування в необхідно зробити вибір початкового значення параметру налаштування $\lambda_{Поч}$. Критерієм вибору конкретного $\lambda_{Поч}$ буде якість перехідного процесу та грубість системи, тобто можливість використовувати $\lambda_{Поч}$ у системі, де визначення параметрів моделі проведене із значною похибкою.

При визначенні λ скористаємося результатами експериментальних досліджень [21], у яких при інших рівних умовах $\lambda_{ПОЧ}$ буде змінюватися наступним чином: $\lambda_i = \{0,5\tau_{ОБМ}; \tau_{ОБМ}; 1,5\tau_{ОБМ}; 2\tau_{ОБМ}; 2,5\tau_{ОБМ}; 3\tau_{ОБМ}\}$, $i = 1...6$

де i - номер експерименту.

Перехідні процеси у системі при різних $\lambda_{ПОЧ}$ зображені на рис. 2.1 та 2.2. Умовно припустимо ситуацію, коли параметри об'єкту визначені з похибкою та збільшимо кожен параметр об'єкту на 50%, і повторимо дослідження при тих же λ_i . Результати представлені на рис. 2.3

Графіки показують, що оптимальним параметром $\lambda_{ПОЧ}$ буде такий, при якому $\lambda_{ПОЧ} = 2\tau_{ОБМ}$. При цьому система має відчутний запас нечутливості та якісний перехідний процес при точному визначенні параметрів моделі.

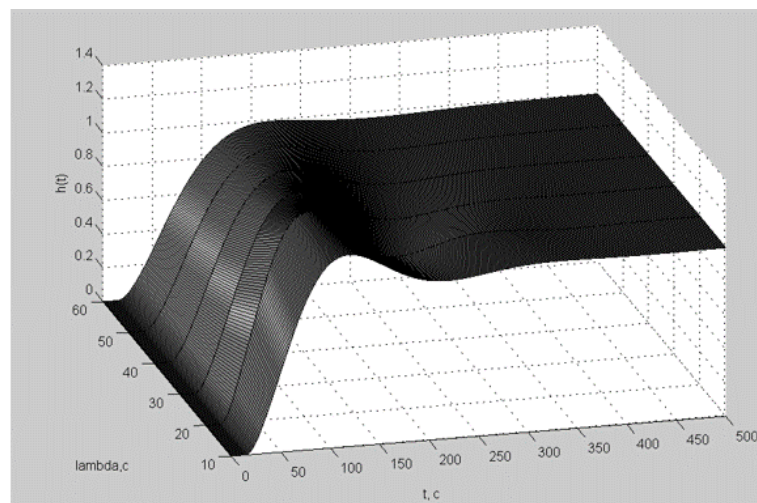


Рис. 2.1 Просторова модель перехідних процесів у системі при різних значеннях $\lambda_{ПОЧ}$ при зміні завдання

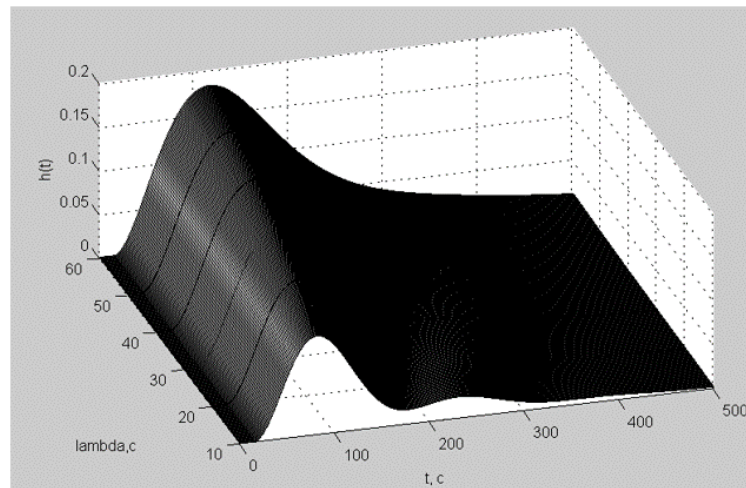


Рис. 2.2 Просторова модель перехідних процесів у системі при різних значеннях $\lambda_{\text{ПОЧ}}$ при відпрацювання збурення на вході об'єкту

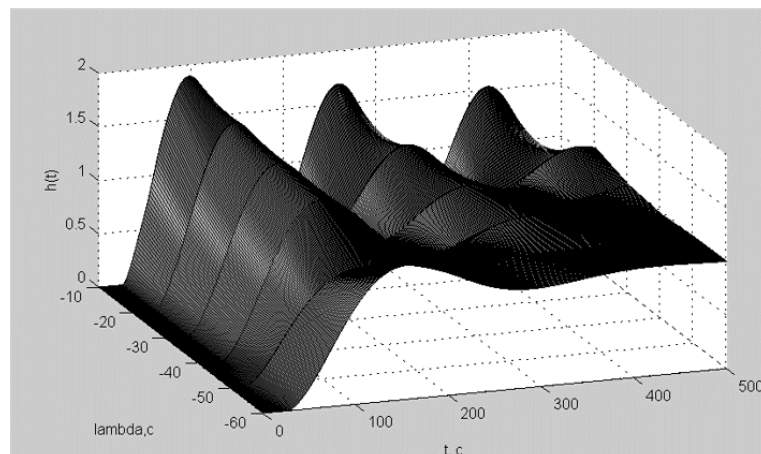


Рис. 2.3 Просторова модель перехідних процесів у системі із зміненими параметрами об'єкта при різних значеннях $\lambda_{\text{ПОЧ}}$

Порівняємо отримані результати (рис. 2.4, графік 1) з роботою системи автоматичного керування з ПІ-регулятором, параметри якого розраховані методом оптимального параметричного синтезу за інтегральним квадратичним показником якості: $K_p = 3,8$, $T_{II} = 64$ (рис. 2.4, графік 2).

Як свідчать отримані графіки, реакція системи на зовнішні збурення практично не змінюється. Водночас система з внутрішньою моделлю демонструє кращу реакцію на зміну завдання: перерегулювання суттєво зменшується, а час перехідного процесу скорочується приблизно на 34%. Попри переваги структури з внутрішньою моделлю над класичним ПІ-регулятором, можливість підвищення якості роботи системи керування не є

необмеженою, оскільки вона визначається особливостями структури контуру керування [13]. На рисунку 2.4.наведені перехідні процеси при зміні завдання $y_3(t)$.

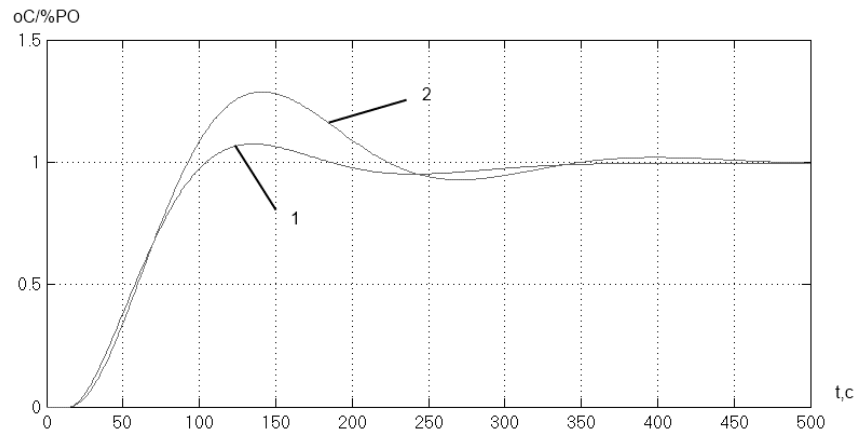


Рис. 2.4. Перехідні процеси в оптимально налаштованих системах автоматичного керування:

1 - система з внутрішньою моделлю, 2 - система с ПІ-регулятором

2.2. Синтез каскадної системи автоматичного керування з використанням моделі об'єкта в структурі регулятора

Велика кількість систем автоматичного регулювання параметрами теплових агрегатів є двоконтурними. У цьому випадку об'єкт керування розбивається на дві ділянки: малоінерційну, або випереджаючу, $W_{\text{ВИП}}(s)$ та інерційну $W_{\text{И}}(s)$.

Особливість схеми, наведеної на рис. 2.5,а, полягає в тому, що головний регулятор $W_p(s)$ налаштовується на еквівалентний об'єкт $W_{\text{ЕКВ1}}(s)$, якій враховує динамічні властивості як інерційної частини об'єкта $W_{\text{И}}(s)$, так і випереджаючої $W_{\text{ВИП}}(s)$; при цьому враховуються також властивості допоміжного регулятора $W_{p1}(s)$. На рис. 2.5,б наведена схема, до якої зводиться каскадна система за умови, що інерційність зовнішнього контуру набагато більша за інерційність внутрішнього. У такому випадку спочатку розраховується $W_p(s)$, а потім на еквівалентний об'єкт $W_{\text{ЕКВ2}}(s)$ налаштовується регулятор допоміжного контуру $W_{p1}(s)$.

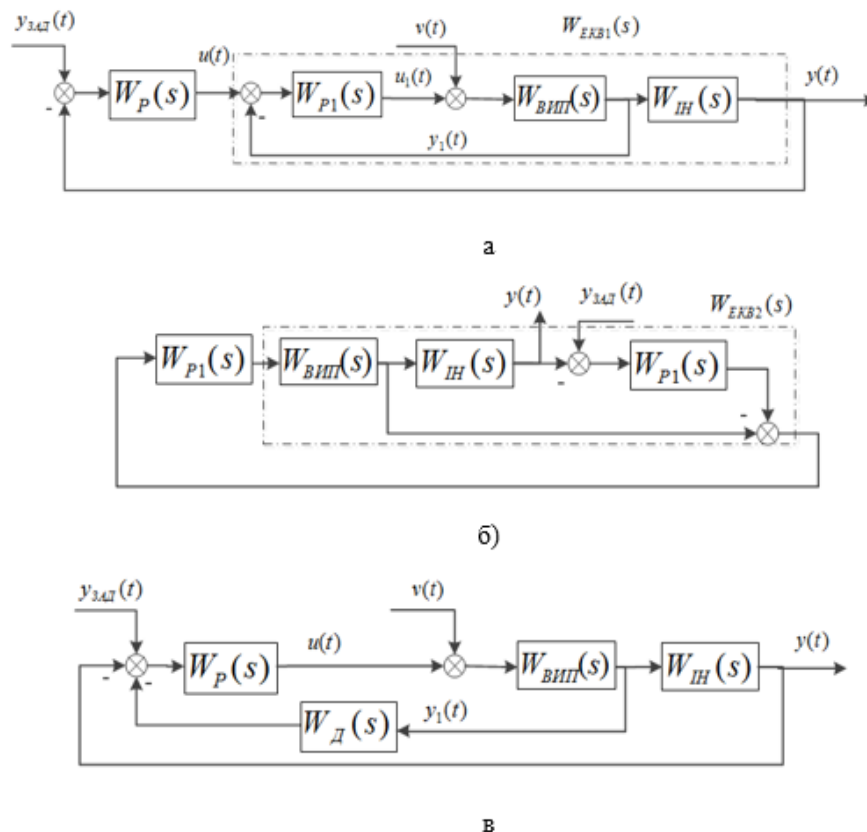


Рис. 2.5 Структури двоконтурних систем керування

У двоконтурній схемі (рис. 2.5, в) з регулятором і диференціатором застосовується лише один регулюючий пристрій. Для підвищення швидкодії до системи вводять диференціальний сигнал від проміжної змінної. Наявність такого сигналу покращує якість перехідних процесів і не впливає на роботу системи автоматичного керування в усталеному режимі.

Система регулювання з подачею похідної від проміжної точки подібна до каскадної, однак функції стабілізуючого регулятора в ній виконує диференціатор. Якщо в ролі диференціатора використовувати ланку з передатною функцією реальної диференціюючої ланки, то під час перетворення цієї структури до схеми каскадної системи регулювання отримуємо звичайний пропорційно-інтегральний регулятор. Отже, для налаштування системи достатньо виконати розрахунок каскадної системи та параметрів диференціатора.

Передатна функція регулятора з внутрішньою моделлю має наступний вигляд:

$$W_P(s) = W_{\Phi}(s)W_{M+}(s)^{-1} \quad (2.2)$$

де $W_{\Phi}(s)$ - передатна функція фільтру, призначеного для налаштування робастності замкненої системи, $W_{M+}(s)$ - передавальна функція частини моделі об'єкта, яка може бути обернена.

Прийнявши, що модель об'єкту $W_M(s)$ повністю відповідає або достатньо близька до моделі об'єкту $W_{OB}(s)$, тобто

$$W_M(s) \approx W_{OB}(s) \quad (2.3)$$

Згідно схеми (рис. 2.5,б), вихідна величина $Y(s)$ (зображення у просторі Лапласа вихідної змінної $y(t)$) визначатиметься наступним відношенням

$$Y(s) = W_P(s)W_{OB}(s)Y_{ЗАВД}(s). \quad (2.4)$$

Підставивши (2.2) в (2.4), отримуємо:

$$Y(s) = W_{\Phi}(s)W_{M+}(s)^{-1}W_{OB}(s)Y_{ЗАВД}(s) \quad (2.5)$$

Описавши об'єкт певною передатною функцією із складовими частинами, що можуть бути інвертовані ($W_{OB+}(s)$) та не можуть ($W_{OB-}(s)$, наприклад, транспортне запізнення), вираз (2.5) можна записати як

$$Y(s) = W_{\Phi}(s)W_{M+}(s)^{-1}W_{OB+}(s)W_{OB-}(s)Y_{ЗАВД}(s). \quad (2.6)$$

Враховуючи вираз (2.3), матимемо:

$$Y(s) = W_{\Phi}(s)W_{OB-}(s)Y_{ЗАВД}(s). \quad (2.7)$$

Отже, система автоматичного керування представленої структури по каналу «завдання - вихідна величина» відтворює динаміку зміни завдання з поправкою на динаміку $W_{\Phi}(s)$ та $W_{OB-}(s)$.

Використаємо вказану властивість для синтезу каскадної системи автоматичного керування. Внутрішній контур, як правило, має швидшу за зовнішній контур динаміку, тому далі будемо розглядати тільки цей випадок.

$$W_{ОБ}(s) = W_{ВНП}(s). \quad (2.8)$$

Для головного ІМС-регулятора (регулятора з внутрішньою моделлю) внутрішній замкнений контур можна вважати «прозорим». Вихід коригувального регулятора буде передаватись в інерційну частину об'єкта керування з динамікою, описаною рівнянням (2.7). Таким чином, об'єктом керування для головного регулятора наближено можна вважати наступну структуру:

$$W_{ОБ}(s) \approx W_{ІН}(s)W_{ВНП\neq}(s)W_{ВНП-}(s) \quad (2.9)$$

де $W_{ІН}(s)$ - інерційна частина об'єкта, $W_{ВНП-}(s)$ - частина об'єкта випереджаючого контуру, яка не може бути обернена (транспортне запізнення), $W_{ВНП\neq}(s)$ - передатна функція фільтру регулятора внутрішнього контуру.

Структурна схема запропонованої каскадної системи подана на рисунку 2.7. Позначення на ній відповідають позначенням, наведеним на рис. 2.6 та 2.7; індекс «м» використовується для позначення моделі відповідної частини об'єкта керування. Вихідні величини внутрішнього контуру та каскаду в цілому змінюватимуться згідно наступних виразів:

$$Y_1(s) = \frac{W_{P1}(s)W_{ВНП}(s)U(s) + W_{ВНП}(s)[1 - W_{P1}(s)W_{ВНПМ}(s)]V(s)}{1 + W_{P1}(s)[W_{ВНП}(s) - W_{ВНПМ}(s)]} \quad (2.10)$$

$$Y(s) = \frac{W_P(s)W_{ОБ}(s)Y_{зад}(s) + W_{ВН}(s)W_{ІН}(s)[1 - W_P(s)W'_{ІНМ}(s)]V(s)}{1 + W_P(s)[W_{ВН}(s)W_{ІН}(s) - W'_{ІНМ}(s)]} \quad (2.11)$$

де

$$W'_{ІНМ}(s) = W_{ВНП\neq}(s)W_{ІНМ}(s)W_{ВНПМ}(s), \quad (2.12)$$

$W_{ВН}(s)$ - передавальна функція внутрішнього контуру.

Таким чином, за умови достатньої відповідності моделі об'єкта реальному об'єкту, система відпрацюватиме завдання зі швидкістю, що визначається сталими часу регуляторів, а функції придушення збурень

$$W_{\text{ОБМ}}(s) = \frac{0,46e^{-21s}}{(109s + 1)} \quad (2.15)$$

$$W_{\text{ВИПМ}}(s) = \frac{0,33e^{-6s}}{(9,15s + 1)}. \quad (2.16)$$

Перехідні процеси, отримані для системи з визначеними моделями об'єкта керування (рис. 2.7), ілюструють, як контур реагує на зміну заданого сигналу та долає дію зовнішніх збурень. Вплив значень сталих фільтрів регуляторів на перехідні процеси подано на рис. 2.8–2.11. З графіків видно, що збільшення сталих фільтра приводить до подовження часу перехідних процесів, але водночас зменшує імовірність виникнення коливань вихідної величини під час роботи системи. Крім того, більші значення сталих фільтра підвищують стійкість системи до похибок у визначенні параметрів моделей та їх змін у процесі роботи технологічного обладнання.

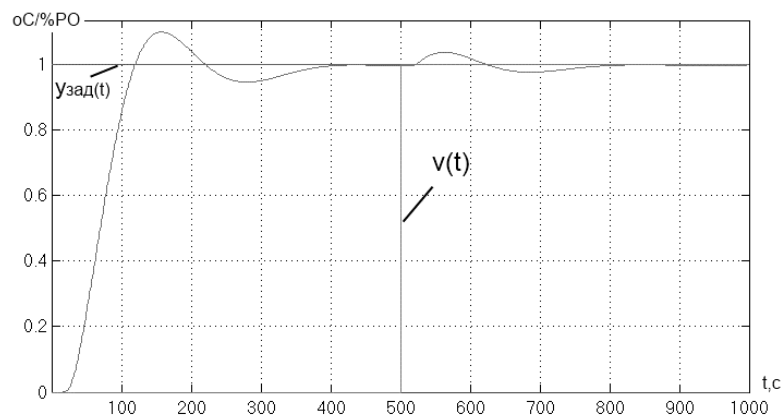


Рис. 2.7. Відгук каскадної системи на зміну завдання та зовнішні збурення

Стала фільтра внутрішнього регулятора чинить незначний вплив на роботу системи під час зміни завдання: інтегральний квадратичний показник якості, навіть за найбільшого досліджуваного значення $\lambda_{\text{ВН}}$, зріс усього приблизно на 15% порівняно з мінімальним. Водночас реакція системи на зовнішні збурення за інтегральним квадратичним показником тим

інтенсивніша, чим меншим є значення цієї сталої — від $\lambda_{BH} - I_{KB}|_{\lambda=0,5\tau} = 0,06$ до $I_{KB}|_{\lambda=3\tau} = 0,24$. Це пояснюється тим, що зменшення сталої фільтра знижує ступінь згладжування сигналу регулятором і, відповідно, збільшує швидкість реагування на збурення.

Характеристика відпрацювання зміни завдання значною мірою залежить не лише від точності ідентифікації моделі об'єкта керування, але й від вибору сталої фільтра головного регулятора, що демонструється на графіку рис. 2.10. Зі збільшенням зменшується коливальність перехідного процесу та величина динамічного вибігу, однак водночас знижується швидкість початкової реакції системи. У результаті інтегральний квадратичний показник якості зростає (на 26% між значеннями $\lambda_{3B} = 0,5\tau$ та $\lambda_{3B} = 3\tau$). Проте, зважаючи на те, що для ряду теплоенергетичного обладнання бажаними є відсутність коливань та мінімальний динамічний викид, оптимальним є компромісний вибір сталої фільтра, який досягається поблизу значення .

При цьому характер реакції системи на зовнішні збурення буде з допустимим динамічним відхиленням та часом перехідного процесу, якій не перевищує $3T_{OBM}$ (рис. 2.11).

Під час зміни навантаження (тобто параметрів об'єкта керування) збільшені значення сталих фільтра фактично згладжують розбіжності між реальною системою та її моделлю. Іншими словами, це підвищує загальну робастність системи.

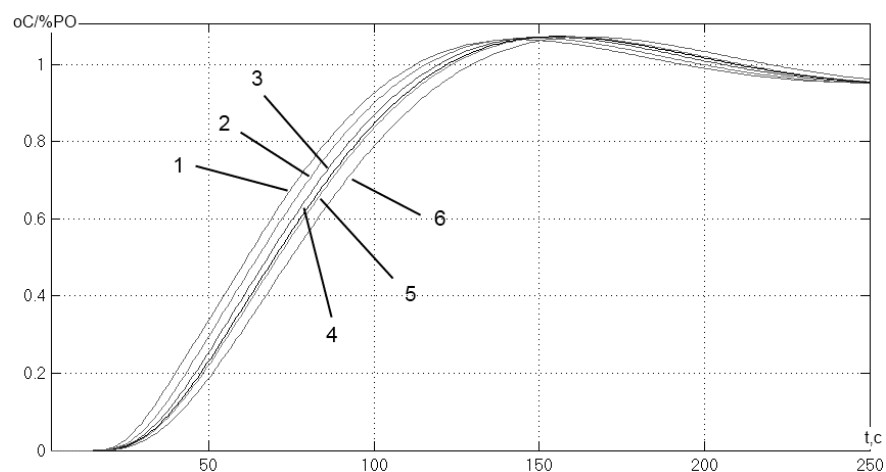


Рис. 2.8. Вплив значення сталої фільтру λ внутрішнього контуру на перехідні процеси в системі:

- 1 - $\lambda = 0,5\tau_{ВИПМ}$; 2 - $\lambda = \tau_{ВИПМ}$; 3 - $\lambda = 1,5\tau_{ВИПМ}$; 4 - $\lambda = 2\tau_{ВИПМ}$; 5 - $\lambda = 2,5\tau_{ВИПМ}$;
6 - $\lambda = 3\tau_{ВИПМ}$

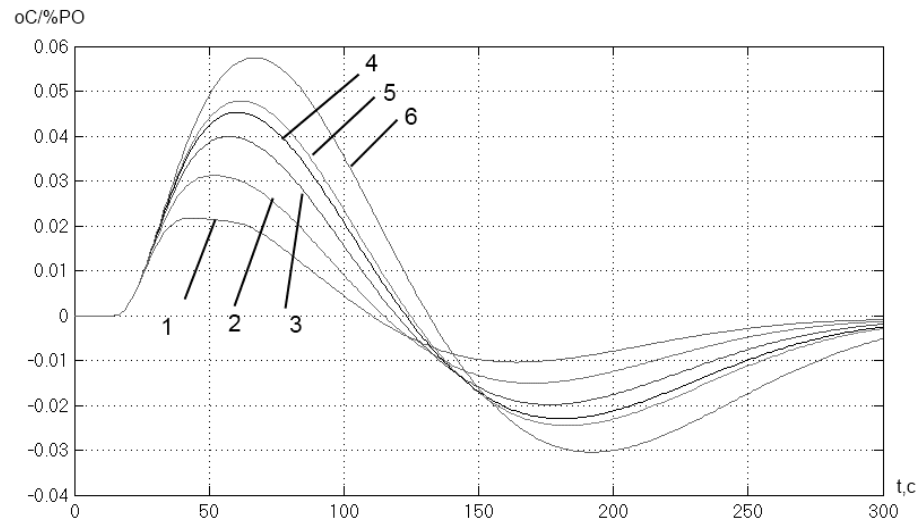


Рис. 2.9. Реакція системи на збурення при різних значеннях сталої фільтру λ внутрішнього контуру:

- 1 - $\lambda = 0,5\tau_{ВИПМ}$; 2 - $\lambda = \tau_{ВИПМ}$; 3 - $\lambda = 1,5\tau_{ВИПМ}$; 4 - $\lambda = 2\tau_{ВИПМ}$; 5 - $\lambda = 2,5\tau_{ВИПМ}$;
6 - $\lambda = 3\tau_{ВИПМ}$

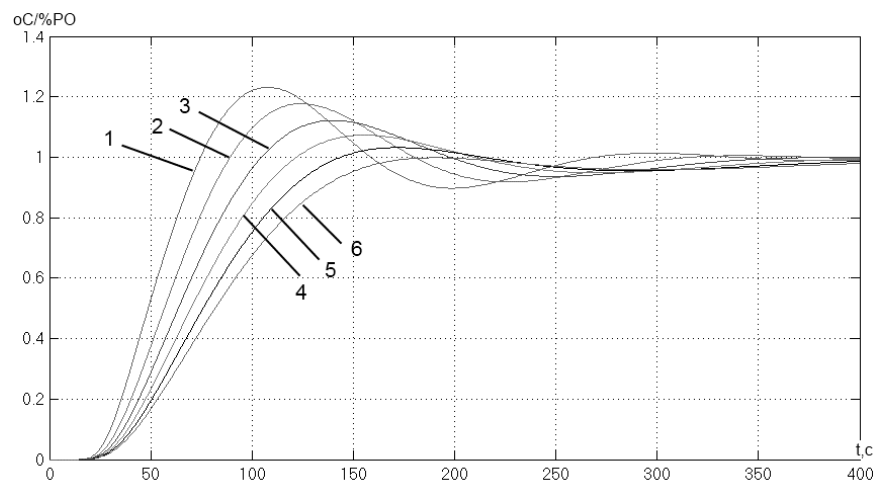


Рис. 2.10 Вплив значення сталої фільтру λ зовнішнього контуру на перехідні процеси в системі:

- 1 - $\lambda = 0,5\tau_{ОБМ}$; 2 - $\lambda = \tau_{ОБМ}$; 3 - $\lambda = 1,5\tau_{ОБМ}$; 4 - $\lambda = 2\tau_{ОБМ}$; 5 - $\lambda = 2,5\tau_{ОБМ}$; 6 -
 $\lambda = 3\tau_{ОБМ}$;

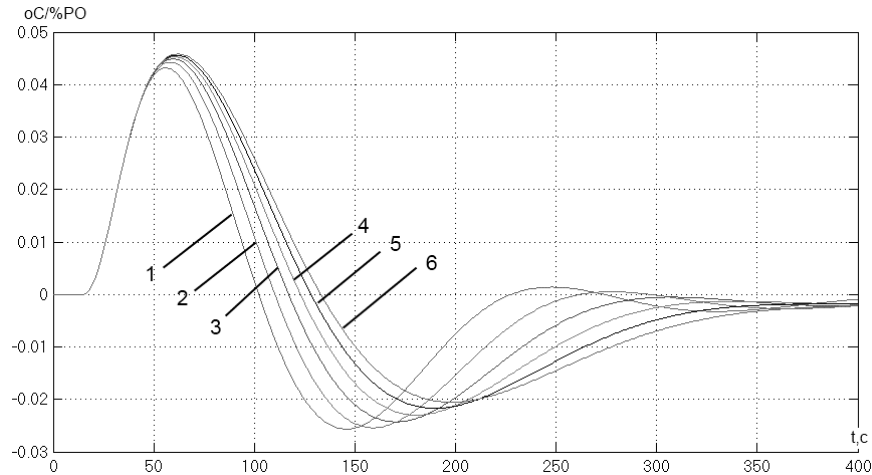


Рис. 2.11 Реакція системи на збурення при різних значеннях сталої фільтру λ зовнішнього контуру:

1 - $\lambda = 0,5\tau_{ОБМ}$; 2 - $\lambda = \tau_{ОБМ}$; 3 - $\lambda = 1,5\tau_{ОБМ}$; 4 - $\lambda = 2\tau_{ОБМ}$; 5 - $\lambda = 2,5\tau_{ОБМ}$; 6 - $\lambda = 3\tau_{ОБМ}$;

На рис. 2.12 і 2.13 наведено приклад роботи каскадної системи автоматичного керування з двома ІМС-регуляторами (регуляторами з внутрішньою моделлю) за різних значень сталих фільтра в умовах, коли режим роботи технологічного обладнання змінився, а модель більше не повністю відповідає реальному об'єкту через розбіжність параметрів. У цьому експерименті передатна функція об'єкта керування має вигляд:

$$W_{об}(s) = \frac{0,63e^{-25s}}{(110s + 1)(37s + 1)} \quad (2.17)$$

Проведене математичне моделювання підтвердило припущення про вплив сталих фільтра регуляторів на грубість системи. Спостерігається чітка тенденція: зі збільшенням значення фільтра система стає більш нечутливою до змін параметрів об'єкта.

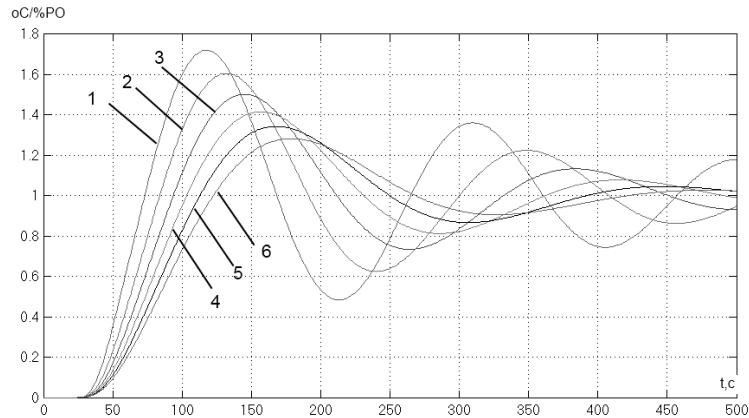


Рис. 2.12. Вплив значення сталої фільтру λ зовнішнього контуру на перехідні процеси в системі при невідповідності моделі контролюваному об'єкту: 1 - $\lambda = 0,5\tau_{OБM}$; 2 - $\lambda = \tau_{OБM}$; 3 - $\lambda = 1,5\tau_{OБM}$; 4 - $\lambda = 2\tau_{OБM}$; 5 - $\lambda = 2,5\tau_{OБM}$; 6 - $\lambda = 3\tau_{OБM}$

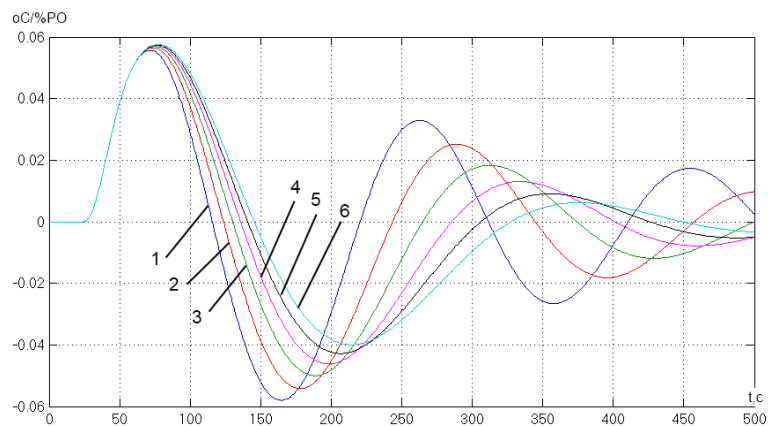


Рис. 2.13 Реакція системи на збурення при різних значеннях сталої фільтру λ зовнішнього контуру після зміни режиму роботи об'єкту: 1 - $\lambda = 0,5\tau_{OБM}$; 2 - $\lambda = \tau_{OБM}$; 3 - $\lambda = 1,5\tau_{OБM}$; 4 - $\lambda = 2\tau_{OБM}$; 5 - $\lambda = 2,5\tau_{OБM}$; 6 - $\lambda = 3\tau_{OБM}$

Подолання збурень і стабілізація керованих параметрів — одні з найпоширеніших завдань в автоматизації теплоенергетичних процесів. Система має забезпечувати утримання контрольованих величин у межах технологічного регламенту, тому дослідження шляхів підвищення

ефективності боротьби зі збуреннями є важливою науковою й практичною проблемою.

2.3 Модифікація каскадної системи керування для стабілізації температури пари

Система автоматичного регулювання температури пари фактично працює як система стабілізації, тому ключовим показником її ефективності є якість відпрацювання збурень, що впливають на об'єкт керування. Для підсилення здатності системи компенсувати збурення необхідно надати їй додаткових функціональних властивостей. З цією метою структуру внутрішнього контуру модифіковано так, щоб він реагував не лише на керуючий сигнал від головного регулятора, але й враховував можливі зовнішні збурення.

Регулятор із внутрішньою моделлю випереджального контуру перетворено на регулятор із двома ступенями свободи, тобто розділено на контури реакції на завдання та на збурення. Такий підхід забезпечує можливість окремого й одночасного налаштування регулятора як на точне відпрацювання завдання від головного регулятора, так і на ефективне придушення збурень шляхом корекції керуючого сигналу.

Структурну схему регулятора з двома ступенями свободи, де об'єктом керування є випереджальна частина пароперегрівника, наведено на рис. 2.14.

Реакція системи по каналу «збурення - вихід» має наступний вигляд:

$$Y_1(s) = (1 - W_{ВНПМ}(s)W_{P1}(s)W_{PK}(s))V(s) \quad (2.18)$$

або

$$Y_1(s) = (1 - W_{ВНПМ}(s)W_{P1}(s)W_{PK}(s))W_{ЗБ}(s)V(s), \quad (2.19)$$

де $W_{ЗБ}(s)$ - передатна функція збурень, які діють на контур керування.

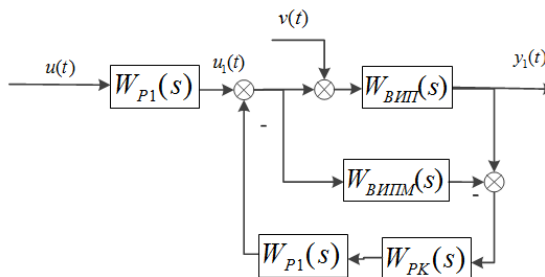


Рис. 2.14. Структурна схема регулятора з внутрішньою моделлю та двома степенями свободи

Компенсатор збурень можна подати у вигляді передатної функції, що містить інформацію про параметри регулятора та узгоджується з динамічними властивостями збурень.

$$W_{ПК}(s) = W_{P1}(s) \cdot W_{PЗБ}(s) \quad (2.20)$$

Передатну функцію компенсатора можливо подати у наступному вигляді:

$$W_{PЗБ}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i s^i}{(\varepsilon s + 1)^n}; \quad \alpha_0 \equiv 1, \quad (2.21)$$

де n - кількість полюсів у моделі збурення у вигляді передатної функції $W_{ЗБ}(s)$, які мають бути скомпенсовані нулями $(1 - W_{ВИПМ}(s)W_{P1}(s)W_{ПК}(s))$:

$$(1 - W_{ВИПМ}(s)W_{P1}(s)W_{ПК}(s, \varepsilon, \alpha)) \Big|_{s=-\frac{1}{T_i}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.22)$$

У випадку, якщо характеристичне рівняння моделі збурення має перший порядок, то можна знайти аналітичне рішення рівняння (2.22). У такому випадку:

$$\alpha_1 = \frac{e^{\tau_{ЗБ}s} \cdot K_{ОБМ}(\lambda s + 1)(\varepsilon s + 1) - 1}{s} \Big|_{s=-\frac{1}{T_{ЗБ}}} \quad (2.23)$$

Параметр ε обирається з вимоги бажаного рівня придушення збурень та визначається ітераційним шляхом.

Алгоритм пошуку налаштування регулятора з двома степенями свободи у загальному вигляді представляється як послідовність наступних кроків:

1. Визначення структури та параметрів моделі об'єкта керування для пошуку оптимальних параметрів регулятора.
2. Розрахунок регулятора , якій включає в себе розділення моделі об'єкта на дві частини: перша - та, яка може бути обернена, і друга - яка ні; вибір порядку фільтру та пошук оптимального для поточного стану об'єкта значення сталої фільтру. Це значення обирається як компроміс між швидкодією та урахуванню можливих похибок у визначенні моделі.
3. Вибір структури компенсатора у наступному вигляді , порядок якого визначається кількістю полюсів моделі збурення, які мають бути нейтралізованими нулями.
4. Пошук значень при обраному значенні таким чином, щоб були задоволені поставлені умови якості протидії збуренням. Значення визначаються як рішення наступних рівнянь для кожного полюсу збурення. Це є ітераційний процес, кий залежить від вибору значення . При цьому інколи потрібно провести кілька кроків пошуку при різних , щоб досягти бажаного результату.

Приймемо, що передавальна функція збурення збігається з передавальною функцією об'єкта керування, тобто збурення впливає безпосередньо на вхід об'єкта. Дія коректора при різних значеннях показана на рис. 2.15, де для порівняння представлено реакцію ІМС-регулятора без корекції. Усі чисельні експерименти проводилися за незмінних налаштувань регуляторів:

$$W_{P1}(s) = \frac{(9s + 1)}{0,32(10s + 1)} . \quad (2.24)$$

З результатів проведених досліджень видно, що значення параметрів коректора, ε та α_i суттєво впливають на форму перехідних процесів при подоланні системою зовнішніх збурень. Зокрема, зменшення ε знижує величину динамічного викиду, проте може спричинити виникнення коливань.

Натомість збільшення ε понад оптимальне значення призводить до погіршення якості керування, що проявляється у зростанні динамічного викиду та часу регулювання.

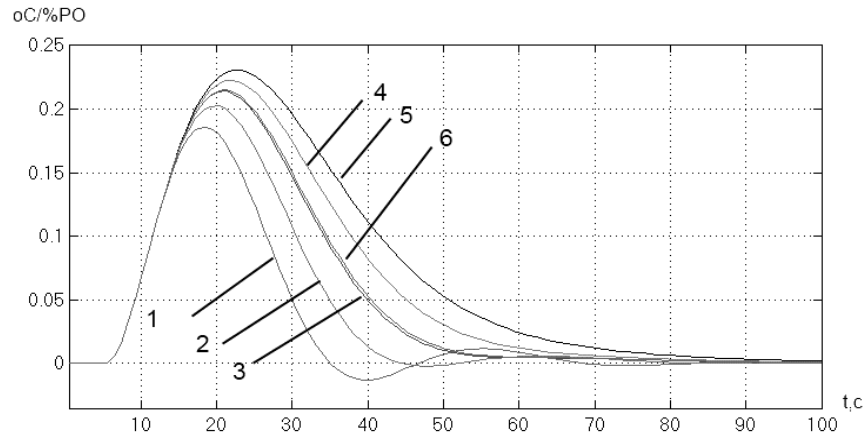


Рис. 2.15. Графіки перехідних процесів у системі з компенсацією збурень при різних значеннях ε

1 - $\varepsilon = 2,9$; 2 - $\varepsilon = 5,8$; 3 - $\varepsilon = 8,7$; 4 - $\varepsilon = 11,6$; 5 - $\varepsilon = 14,5$; 6 – регулятор з внутрішньою моделлю без компенсації збурень.

На базі запропонованої структури з регулятором внутрішньої моделі та двома ступенями свободи системи була створена каскадна система автоматичного регулювання (рис. 2.16). Вона відрізняється від існуючих рішень способом формування керуючого впливу, який враховує як сигнал завдання, так і наявні в системі збурення. Результати моделювання, що демонструють переваги запропонованої системи у подоланні збурень, наведені на рис. 2.17. Як видно з рисунка, застосування каскадної системи з корекцією збурень дозволяє скоротити час регулювання та динамічний викид на 21% та 54% відповідно, одночасно зменшивши інтегральний квадратичний показник якості у 2,8 рази.

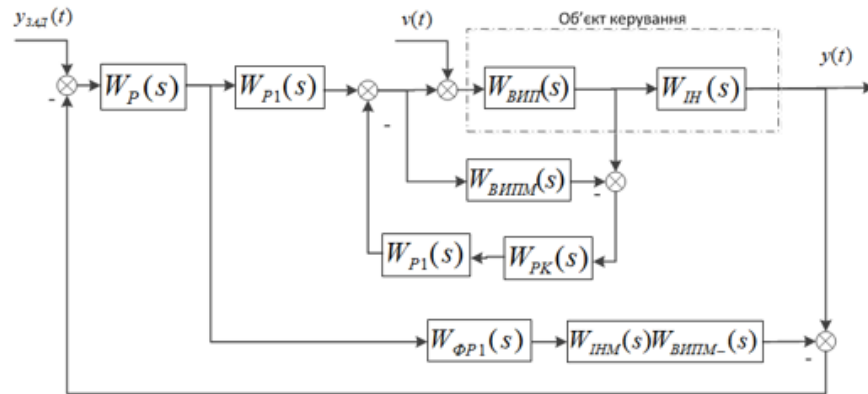


Рис. 2.16 Структурна схема каскадної системи автоматичного керування з компенсатором зовнішніх збурень

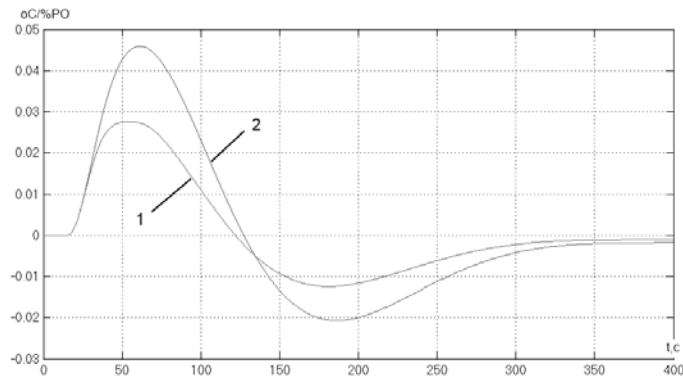


Рис. 2.17. Перехідні процеси в каскадних системах керування з регуляторами, що містять внутрішню модель, при впливі збурень:
 1 — каскадна система з компенсацією збурень;
 2 — каскадна система з двома регуляторами на основі внутрішньої моделі.

2.4. Порівняльний аналіз системи автоматичного керування температурою пари з наявними системами

Система автоматичного керування досліджувалася при трьох рівнях навантаження теплового агрегату: номінальному (300 МВт), мінімальному (230 МВт) та проміжному (275 МВт), при витраті води від 160 до 230 т/год. Для експериментів використовувалися наступні двоконтурні системи: каскадна система з регуляторами з внутрішньою моделлю, каскадна система з регуляторами з внутрішньою моделлю та компенсацією збурень, каскадна

система з двома ПІ-регуляторами та система керування з ПІ-регулятором і диференціатором. Одноконтурна система автоматичного керування не розглядалася через її недостатню ефективність у забезпеченні необхідних показників якості роботи контуру теплового агрегату.

На рис. 2.18 та 2.19 представлені графіки (неперервні лінії) зміни температури пари за пароперегрівачем при номінальному навантаженні та таких збуреннях: зміна завдання з 520 до 525 °С і зменшення витрати води на 10 % (з 10,8 до 9 т/год).

Аналіз показав, що при зміні завдання найгіршу якість перехідних процесів демонструє система з ПІ-регулятором і диференціатором. Система з двома ПІ-регуляторами показує близькі результати. У той же час, каскадна САР з регуляторами з внутрішньою моделлю майже не має перерегулювання та коливань, що повністю відповідає вимогам до систем автоматичного керування. Ідентична поведінка обох ІМС-систем пояснюється особливостями внутрішнього контуру з двома степенями свободи, який розділяє канали завдання та збурень.

При аналізі реакції на збурення традиційні системи, налаштовані на цей канал, не поступаються ІМС-системі щодо перерегулювання, проте демонструють затухання до 0,75, тоді як у ІМС-системі процес аперіодичний. Система з регуляторами з внутрішньою моделлю та додатковим компенсатором збурень забезпечує зменшення максимального відхилення до 40 %. Також наведені результати моделювання роботи системи автоматичного керування внаслідок зміни навантаження енергоблоку до 0,7 від номінальної (160 МВт) за аналогічних умов: зменшення витрати води на 10% (з 9,6 т/год до 8 т/год - рис. 2.21 та зміни завдання (рис. 2.20). На рисунках перехідні процеси у системах за вказаних умов зображені пунктирними лініями.

З графіків видно, що при роботі теплового агрегату на зниженому навантаженні, що становить 70 % від номінального, якість роботи системи автоматичного керування погіршилася: значно зросла коливальність, а час перехідного процесу збільшився більш ніж у 1,5 раза.

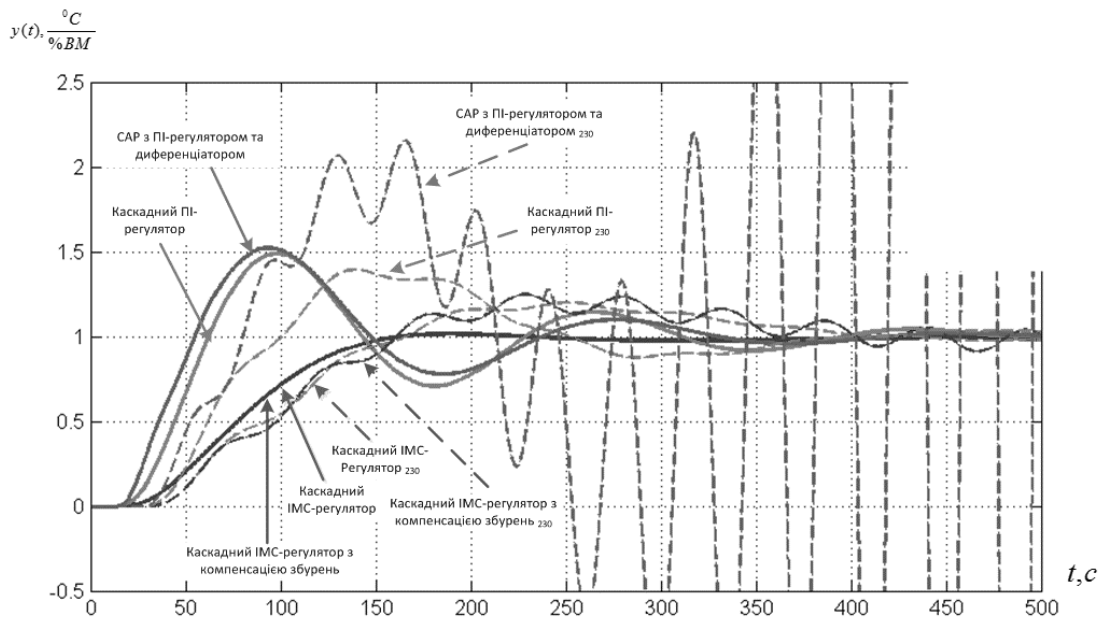


Рис. 2.18. Перехідні процеси у системі автоматичного керування температурі пари при зміні завдання

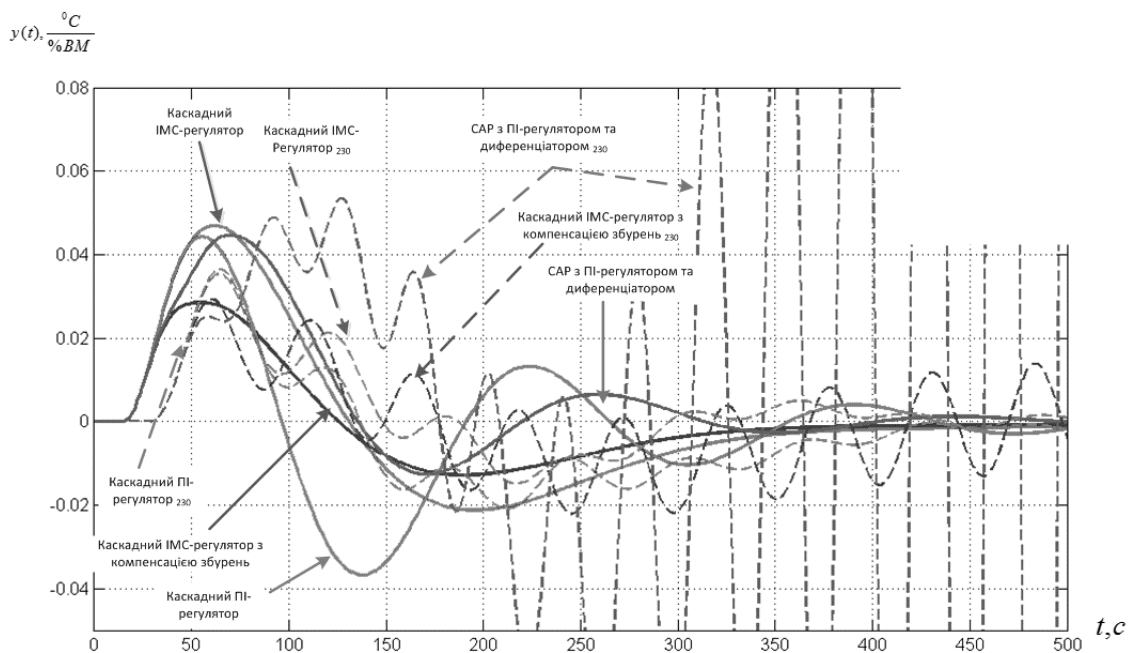


Рис. 2.19. Перехідні процеси у системі автоматичного керування температурі пари для випадку подолання збурення витратою води

У ряді випадків система керування може втрачати стійкість (зокрема, система з ПІ-регулятором і диференціатором, а також система з регулятором з внутрішньою моделлю та компенсацією збурень, яка працює майже на межі стійкості). Натомість система з двома ПІ-регуляторами та розроблена каскадна

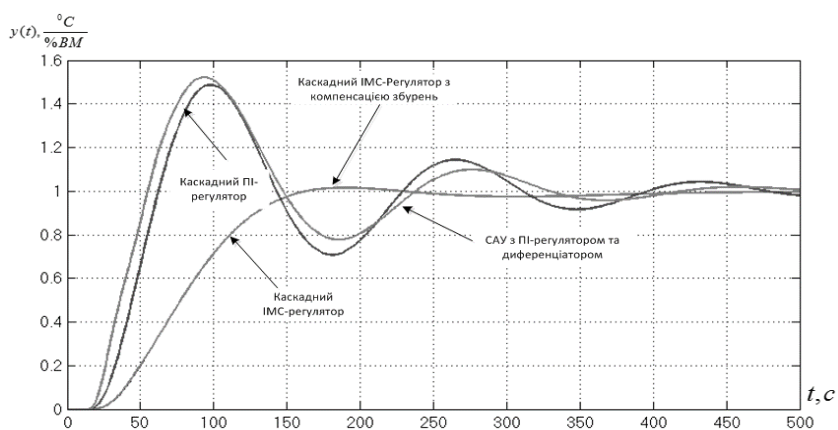
система на основі концепції ІМС залишилися стабільними, хоча й продемонстрували підвищену коливальність. Це свідчить про те, що контур керування потребує такої системи автоматичного регулювання, яка здатна коректно реагувати на параметричні зміни, спричинені зміною навантаження.

Розглянемо роботу системи автоматичного керування температурою пари в умовах, коли оптимальні параметри регуляторів визначені для основних режимів роботи теплового агрегату та після завершення перехідних процесів встановлюються як робочі. Оптимальними вважаються ті параметри, що забезпечують найкраще відпрацювання збурень за інтегральним середньоквадратичним критерієм.

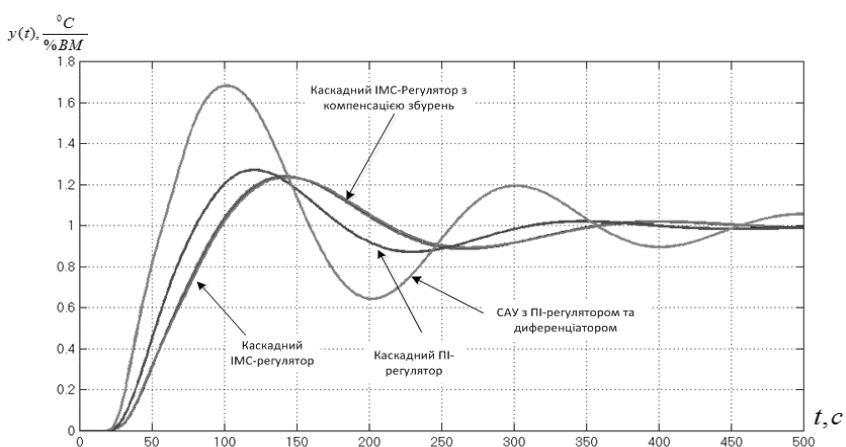
У разі збурення, спричиненого зміною подачі води, отримано перехідні процеси, наведені на рис. 2.21. Відповідь на зміну завдання для різних систем керування за різних навантажень представлена на рис. 2.20. Як показують ці залежності, використання параметрів регуляторів, оптимізованих за інтегральним квадратичним критерієм для робочого режиму агрегату, забезпечує ефективне відпрацювання завдання та якісне стабілізування температури.

Разом з тим, при однакових умовах порівняння каскадна система з регуляторами з внутрішньою моделлю демонструє кращі показники роботи порівняно з іншими: менше перерегулювання, аперіодичний характер перехідного процесу та мінімальний час регулювання.

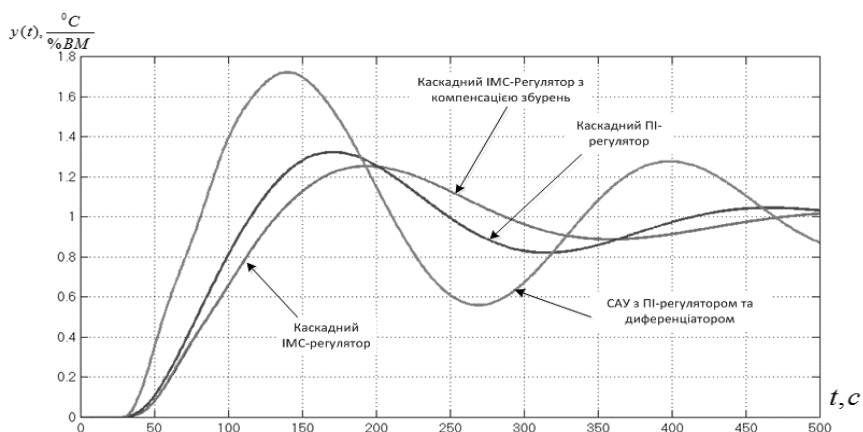
Оскільки для стабілізації температури пари ключовим є якісне відпрацювання зовнішніх збурень, оцінити ефективність систем можна за діаграмами показників якості, наведеними на рис. 2.22.



а



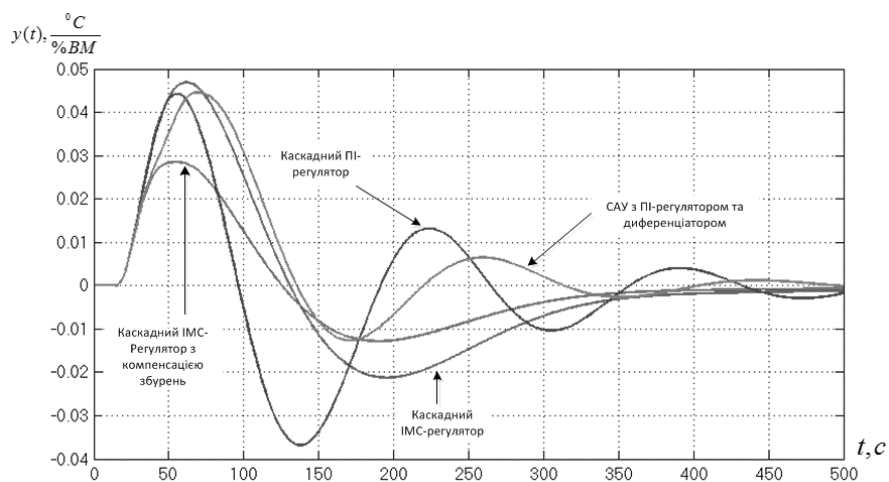
б.



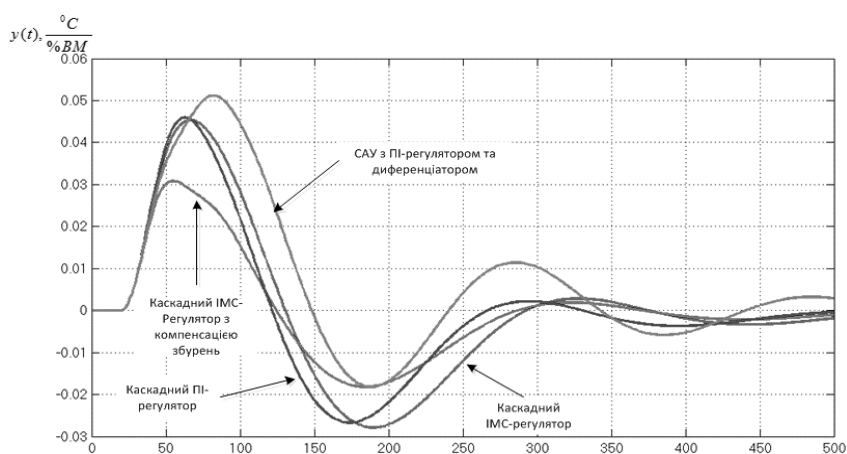
в.

Рис. 2.20. Перехідні процеси у системі автоматичного керування температурі пари при зміні завдання:

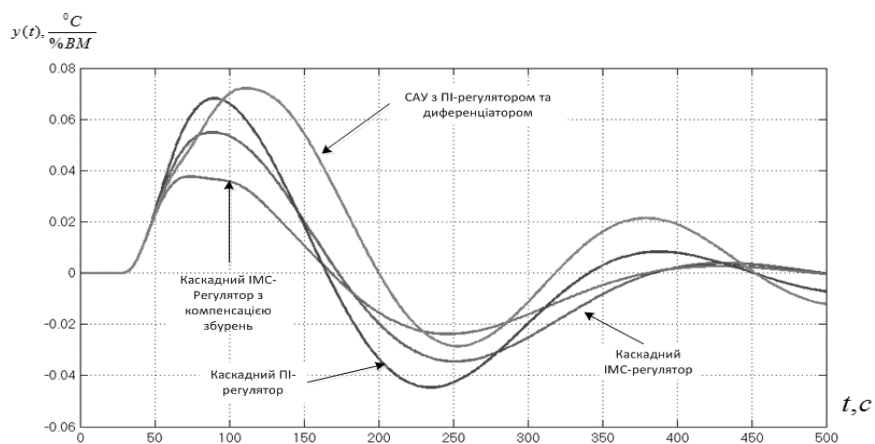
а - навантаження 300 МВт, б - навантаження 275 МВт, в - навантаження 230 МВт.



а.



б.



в.

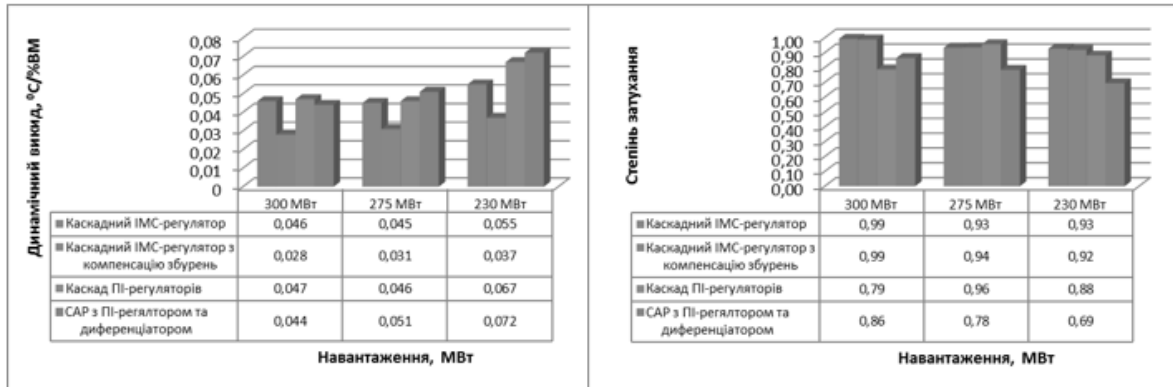
Рис. 2.21 Реакція систем автоматичного керування різної структури на збурення витратою води:

а - навантаження 300 МВт, б - навантаження 275 МВт, в - навантаження 230 МВт.

Аналіз діаграм (рис. 2.22) продемонстрував переваги запропонованої системи автоматичного керування температурою пари, побудованої на каскаді регуляторів з внутрішньою моделлю та компенсацією збурень, у порівнянні з відомими системами керування. Зокрема, зменшення інтегрального квадратичного показника якості на 44 %, практично аперіодичні перехідні процеси та мінімальний час регулювання забезпечують підвищену ефективність роботи теплового агрегату.

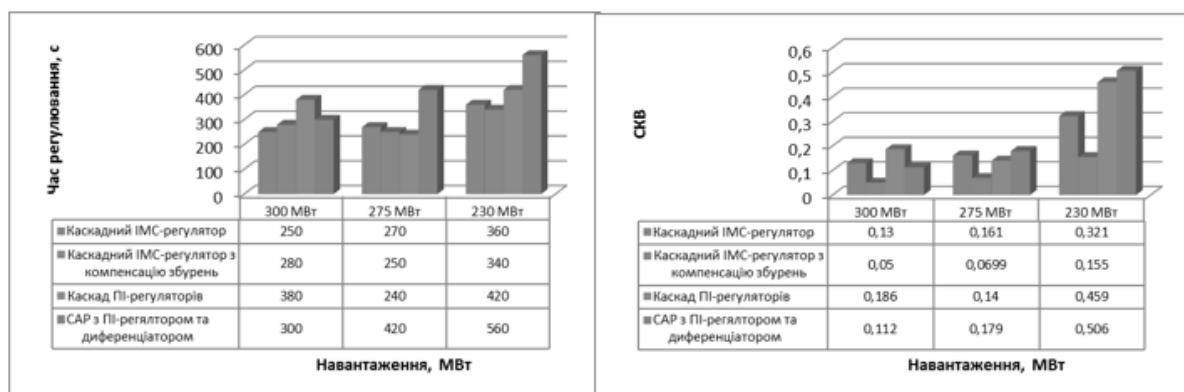
Отримані результати підтверджують необхідність використання різних параметрів налаштування регуляторів системи автоматичного керування температурою пари залежно від навантаження теплового агрегату.

Перед впровадженням систем автоматичного керування в складні та потенційно небезпечні технологічні процеси важливо переконатися, що їх застосування не спричинить аварійних ситуацій унаслідок некоректного вибору структури або помилок у розрахунку параметрів налаштування регуляторів.



а)

б)



в)

г)

Рис. 2.22 Показники якості роботи систем автоматичного керування на різних навантаженнях теплового агрегату:

а) - величина динамічного викиду (перерегулювання), б) - степінь затухання, в) - час регулювання, г) - інтегральний квадратичний критерій якості

Стійкість є ключовою умовою надійного функціонування системи автоматичного керування температурою пари, тому важливою задачею є як оцінювання стійкості системи, так і визначення її якісних показників роботи.

Для аналізу характеристик стійкості використано критерій Найквіста, який дає змогу графічно оцінити стійкість замкнутої системи за частотним годографом передатної функції розімкненого контуру, побудованим у полярних координатах.

Теоретичні дослідження виконано для режимів роботи теплового агрегату, що відповідають мінімальному (230 МВт), максимальному (300 МВт) та проміжному (275 МВт) тепловим навантаженням. Для порівняння розглянуто результати роботи системи автоматичного керування з двома ПІ-регуляторами та системи з ПІ-регулятором і диференціатором — класичних структур, що нині застосовуються для регулювання температури пари теплових агрегатів. У кожному режимі використано оптимальні параметри налаштування регуляторів, визначені за інтегральним квадратичним критерієм якості.

Згідно критерію Найквісту, система в замкнутому стані буде стійкою, якщо годограф розімкненої системи не охоплює точку $(-1; j0)$ або, більш суворо, різниця між кількістю позитивних та негативних переходів годографа розімкненої системи на відрізку $(-\infty; -1]$ дійсної осі буде дорівнювати $0,5n$, де n - кількість коренів характеристичного рівняння розімкненої системи, що знаходяться в правій півплощині.

Таким чином, застосування критерію Найквіста до систем автоматичного керування зводиться до дослідження поведінки годографа Найквіста відносно точки $(-\infty; -1]$. Побудовані годографи для систем автоматичного керування, що розглядаються, наведені на рис. 2.23.

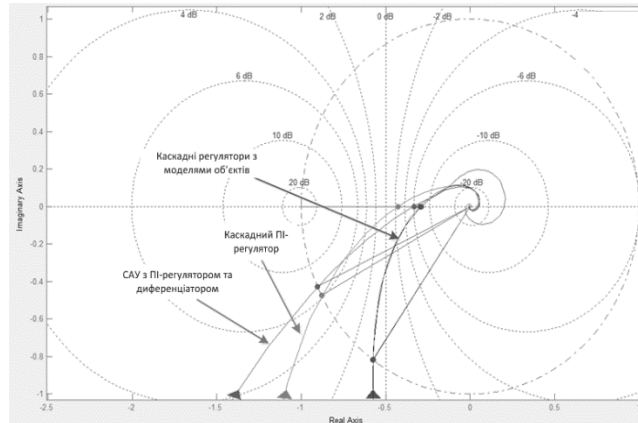
Як видно з поданих рисунків, годографи розімкнених систем з ІМС-регуляторами (з компенсацією збурень та без неї), каскадної системи з ІІ-регуляторами та із системою з введенням похідної не охоплюють точку $(-1;j0)$. Це дає можливість стверджувати, що замкнена система автоматичного керування температури пари, побудована за такими структурами буде стійкою.

У процесі експлуатації систем автоматичного керування їхні параметри можуть змінюватися з часом або під дією зовнішніх дестабілізуючих факторів. Це здатне викликати спотворення амплітудних та фазових частотних характеристик і, відповідно, вплинути на стійкість системи. Тому важливо визначити діапазон можливих змін параметрів, за якого система не втратить стійкість.

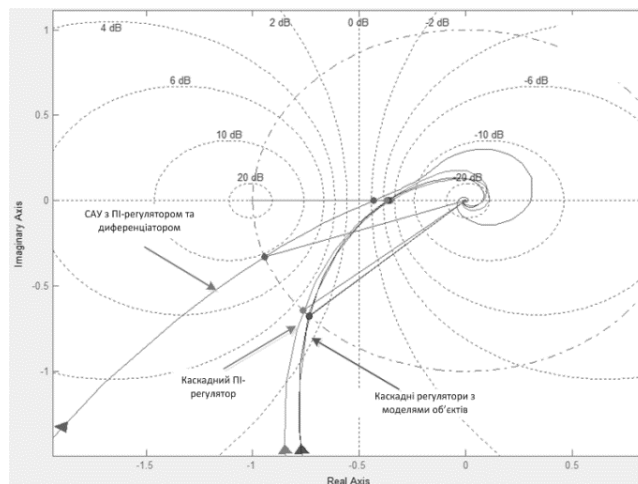
Запас за модулем у децибелах визначається як вертикальна відстань між амплітудною характеристикою та рівнем 0 дБ на частоті, де фазовий зсув дорівнює -180° . Запас за фазою, своєю чергою, обчислюють як різницю між фазовою характеристикою та рівнем -180° на частоті зрізу. На рисунку 2.23 показано результати аналізу амплітудно-фазових характеристик розімкнених систем та позначено точки, що відповідають необхідним запасам стійкості.

З аналізу побудованих графіків видно, що запропонована система з каскадною структурою регуляторів та внутрішньою моделлю забезпечує більші запаси стійкості за амплітудою і фазою порівняно з іншими системами автоматичного керування в усіх режимах роботи теплового агрегату. При цьому отримані значення запасів стійкості відповідають практичним рекомендаціям [12], згідно з якими для надійного функціонування системи керування фазовий запас має становити не менше $30\dots 60^\circ$, а амплітудний — $6\dots 14$ дБ. З поданих графіків видно, що, наприклад, у режимі роботи теплового агрегату на повній потужності за встановлених параметрів регуляторів система з каскадом ІМС-регуляторів перебуватиме на межі стійкості за умови збільшення коефіцієнта підсилення на 10,8 дБ. Для системи з диференціатором це значення становить лише 9,56 дБ, а для каскаду ІІ-регуляторів — 7,37 дБ

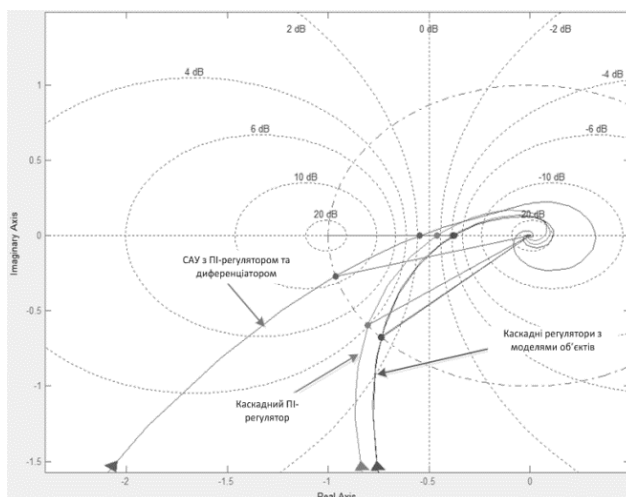
(рис. 2.23, а). При цьому фазовий запас запропонованої системи дорівнює $54,9^\circ$, тоді як у системи з диференціатором він складає $25,4^\circ$, а у каскадній структурі з ПІ-регуляторами — $28,4^\circ$. Зазначена перевага запропонованої системи зберігається і для інших режимів роботи (рис. 2.23, б, в). Порівняльні діаграми (рис. 2.24 та 2.25) узагальнюють дані щодо різних режимів функціонування теплового агрегату та відповідних запасів стійкості для розглянутих структур систем керування.



а



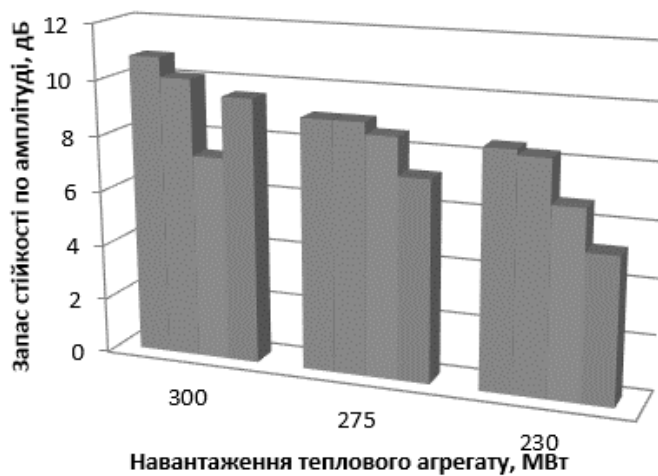
б



В

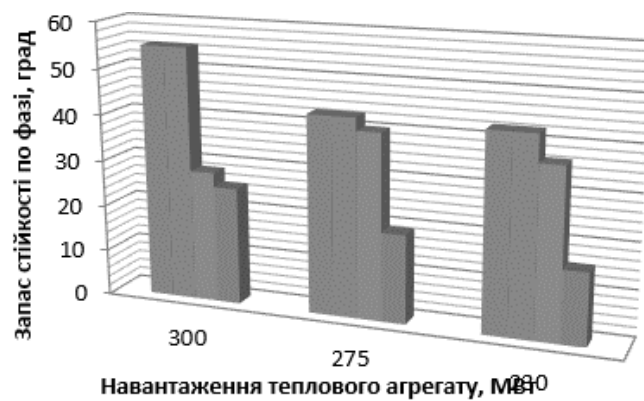
Рис. 2.23 АФХЧ розімкнених систем автоматичного керування при різних навантаженнях теплового агрегату:

а - навантаження 300 МВт; б - навантаження 275 МВт, в - навантаження 230 МВт.



	Навантаження теплового агрегату, МВт		
	300	275	230
■ Каскадний ІМС-регулятор з компенсацію збурень	10,8	9,03	8,5
■ Каскадний ІМС-регулятор	10,1	9,03	8,31
■ Каскад ПІ-регуляторів	7,37	8,61	6,74
■ САУ з ПІ-регулятором та диференціатором	9,56	7,26	5,25

Рис. 2.24 Залежність запасів стійкості по амплітуді від режиму роботи теплового агрегату для різних систем автоматичного керування.



	300	275	230
■ Каскадний ІМС-регулятор	54,9	42,8	42,5
■ Каскадний ІМС-регулятор з компенсацію збурень	54,9	42,8	42,5
■ Каскад ПІ-регуляторів	28,4	40,1	36,6
■ САР з ПІ-регулятором та диференціатором	25,4	19,2	15,6

Рис. 2.25 Залежність запасів стійкості по фазі від режиму роботи теплового агрегату для різних систем керування

Висновки до розділу 2

1. Проведено дослідження одноконтурної системи автоматичного керування пароперегрівачем із регулятором на основі внутрішньої моделі. Визначено особливості впливу параметрів налаштування на динаміку зміни температури пари під час зміни завдання та компенсації збурень.

2. Порівняльний аналіз запропонованої системи та системи автоматичного керування з ПІ-регулятором показав, що використання регулятора з внутрішньою моделлю дає змогу суттєво зменшити перерегулювання і скоротити тривалість перехідного процесу.

3. Розроблено каскадну систему автоматичного керування на основі послідовно з'єднаних регуляторів із внутрішньою моделлю, у якій регулятор випереджального контуру має дві ступені свободи. Така структура дала можливість розділити канали керування та стабілізації й забезпечити необхідні показники якості як при зміні завдання, так і при дії збурень.

4. Досліджено роботу каскадної системи автоматичного керування температурою пари в умовах змінних режимів теплового агрегату при зміні навантаження від мінімальних 230 МВт до 300 МВт. Застосування запропонованого регулятора дозволило сформувати перехідні процеси, близькі до аперіодичних, скоротити час регулювання на 45–55 % та зменшити інтегральні показники якості на 52 % порівняно з типовими регуляторами.

РОЗДІЛ 3 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПАРИ

3.1. Структура системи автоматичного регулювання температури пари

Оптимальною вважається така структура системи автоматичного керування, у якій усі підсистеми організовані за ієрархічним принципом (рис. 3.1). На нижньому рівні працюють автономні системи керування, що синхронізуються з диспетчерським пунктом для отримання додаткових даних, необхідних для підвищення ефективності роботи та приймання команд від оператора чи супервізорного автоматичного модуля. Така організація підвищує загальну надійність системи: високий рівень відмовостійкості дозволяє контурам керування працювати автономно, а оператор, за потреби, може здійснювати коригування та налаштування з центрального пульта.

Перший рівень — рівень устаткування — охоплює засоби збору даних про параметри технологічного процесу, режими та стан обладнання, що входить до складу системи керування.

Другий рівень — рівень автоматизації (оперативного керування) — включає спеціалізовані засоби збору інформації та керування технологічним процесом, а також стандартні послідовні інтерфейси для взаємодії з іншими рівнями системи.

Третій рівень — рівень диспетчеризації — являє собою апаратно-програмний комплекс, який забезпечує керування технологічним обладнанням, а також виконує функції візуалізації, сигналізації, архівування параметрів і подій, та інші інструменти для спрощення аналізу стану обладнання (АРМ — автоматизоване робоче місце диспетчера).

Контролер системи здійснює безперервне регулювання температури пари й підтримує технологічні параметри в заданих межах, передаючи інформацію на АРМ диспетчера. Водночас він працює автономно, незалежно від стану диспетчерського робочого місця.

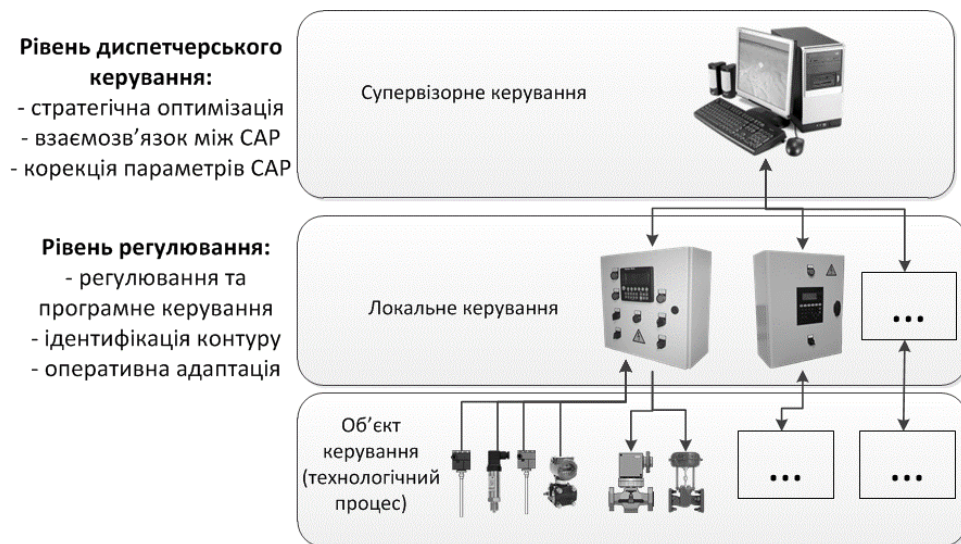


Рис. 3.1 Структура системи автоматичного керування температури пари

Програмне забезпечення контролера виконує приймання та обробку сигналів від давачів (сенсорів), формує керуючі дії для виконавчих механізмів відповідно до заданих алгоритмів, а також генерує аварійні, попереджувальні та тривожні повідомлення у разі відхилення параметрів від нормального режиму роботи. Крім того, контролер забезпечує інформаційний обмін із АРМ диспетчера.

Коли виявляється будь-який позаштатний стан — тобто невідповідність між заданою командою (уставкою) та фактичним значенням параметра чи станом обладнання — система формує повідомлення про аварію, тривогу або попередження, які супроводжуються відповідним звуковим сигналом. Таке повідомлення містить ідентифікацію технологічної підсистеми, сенсора або виконавчого механізму, що викликав сповіщення, опис причини події, а також значення параметра, що вийшов за допустимі межі.

Під час розроблення системи автоматичного регулювання температури пари доцільно застосовувати сучасні промислові SCADA-системи [32, 33] та промислові контролери для створення локальної системи керування технологічним параметром — температурою пари. Такий підхід дає змогу використовувати однакові програмні та апаратні інструменти як на етапі моделювання, так і під час впровадження та подальшої експлуатації системи, що скорочує час розробки та знижує ймовірність помилок.

При доборі необхідного програмно-технічного забезпечення обов'язковою вимогою є використання промислового обладнання, яке підтримує типовий функціонал систем автоматизації: програмування мовами стандарту MEK-61131, можливість взаємодії з центральною ЕОМ через промислову мережу передачі даних, а також наявність інструментів для реалізації людино-машинного інтерфейсу. Одним із відомих стандартних комплексів керування технологічними об'єктами, що повністю відповідає цим вимогам, є комплекс «Segnetics» у поєднанні з промисловою SCADA-системою «MasterSCADA».

Запропонована система автоматичного керування складається з такого обладнання:

- програмований логічний контролер Segnetics SMH-2G;
- конвертер інтерфейсів USB↔RS485 Моха, який забезпечує зв'язок контролера з комп'ютером через промисловий протокол Modbus-RTU;
- верхній рівень керування на базі персонального комп'ютера з процесором класу не нижче Intel Core2Duo;
- додаткові елементи для побудови локальної системи керування (блоки живлення, клемні колодки тощо).

Контролер Segnetics SMH-2G дає змогу реалізувати контур автоматичного керування відповідно до необхідних алгоритмів. У штатному режимі він забезпечує виконання закладених алгоритмів та початкових налаштувань автономно, без постійного підключення верхнього рівня системи.

Моха Uport-11501 служить стандартним засобом зв'язку між рівнями системи автоматичного керування. Пристрій перетворює сигнали від станції верхнього рівня в електричні сигнали інтерфейсу RS-485, забезпечуючи реалізацію фізичного рівня для промислового протоколу Modbus-RTU. Відповідно до стандартної специфікації, станція верхнього рівня може знаходитись на відстані до 1000 м від контролера, при цьому швидкість передачі даних між станцією та контролером може досягати 11500 Кбіт/с. Оптимальні параметри швидкості встановлюються під час початкового

налаштування системи і залежать від відстані між її компонентами та фактичного маршруту прокладання інформаційної траси. Інтерфейсний перетворювач оснащений гальванічною розв'язкою, що додатково захищає обладнання від зовнішніх електричних перешкод.

ПК оснащено спеціалізованим програмним забезпеченням, розробленим на базі середовища SCADA-пакету, призначеним для оперативного контролю стану системи автоматичного керування. Програма забезпечує архівування показників сенсорів та елементів системи, відображення оперативної інформації на робочому місці оператора у вигляді мнемосхем, графіків та таблиць, а також формування звітів про стан системи.

Розроблені алгоритми керування можуть застосовуватися як у локальних системах автоматизації, так і на рівні супервізорного керування всім технологічним обладнанням, що забезпечує гнучкість роботи та оптимальне використання технічних можливостей системи.

Система автоматичного керування температурою пари, як правило, функціонує в режимі стабілізації. Основні компоненти контуру керування температурою включають контролер з реалізованими алгоритмами керування, сенсори температури, розташовані після камери впорскування води та після пароперегрівача, а також виконавчий орган (рис. 3.2).

В якості контролера застосований Segnetics SMH 2Gi - вільно-програмований панельний контролер. В якості операційної системи SMH 2Gi використовує Linux. SMH 2Gi має наступні технічні характеристики: мікроконтролер iMx27 з ядром ARM926EJ-S, розрядність шини 32 bit; робоча частота мікроконтролера складає 400 МГц; операційна система Linux версія 2.6.29; розмір та тип оперативної пам'яті - 64, розмір та тип флеш-пам'яті = 128MByte NAND Flash. Комунікаційні властивості: порти RS 232, RS 485, USB Host - USB типу A, USB Device - USB типу miniAB, Ethernet - 10/100Mbit. FTP, HTTP. На борту контролера присутні 3 - 5 гальванічно розв'язаних цифрових входів (конфігурується програмно), 2 транзисторних виходи + 1

оптореле. Для реалізації необхідної конфігурації підключаються зовнішні модулі вводу/виводу.

На вхід контролера надходять сигнали від сенсорів температури, а також сигнал від виконавчого механізму про положення регулюючого органу. Контролер, відповідно до розробленого закону керування, формує сигнал управління, який передається на виконавчий механізм (ВМ). У якості ВМ застосовується однообертвий механізм постійної швидкості.

Виконавчий механізм оснащений однофазним асинхронним двигуном конденсаторним типу ДАУ, серед переваг якого є малоінерційність, висока надійність і здатність працювати на упор, з часом повного переміщення вихідного штока $T_{BM} = 10\text{с}$.

Як регулюючий орган (РО) використовується шиберний клапан з параметрами: витрата конденсату $D_{ВЩР} = 17,6$ т/год; умовний прохідний отвір $d_y = 50$ мм; втрати тиску на клапані $\Delta P_K = 1,8$ МПа. Регулюючий орган змінює витрату води, яка направляється у випарну камеру, тим самим змінюючи температуру пари після впорскування.

На структурній схемі рис. 3.2 виконавчий механізм ВМ разом з регулюючим органом РО представлені у вигляді виконавчого органу.

Температури після зони впорскування води та на виході пароперегрівача вимірюються хромель-копелевими термопарами ТП типу ТХК-0515 з діапазоном вимірювання температури $-50 \div 600$ °С, які розташовані в захисних кожухах діаметром 10 мм зі сталі 12Х18Н10Т. Це дозволяє використовувати їх при тиску вимірюваного середовища до 500 атмосфер. Інерційність термопари складає 10 с.

Сигнал з виходу термопари надходить на нормуючий підсилювач НП, виконаний таким чином, щоб при зміні температури на ± 50 °С від заданого значення напруга на вході НП змінювалося від 4 до 20 мА. При заданому значенні температури $t_m = 545$ °С сигнал на виході НП дорівнює 12 мА. Сигнал

з виходу НП надходить на контролер. На структурній схемі рис. 3.2 нормуючий перетворювач НП і термопара ТП представлені у вигляді давача.

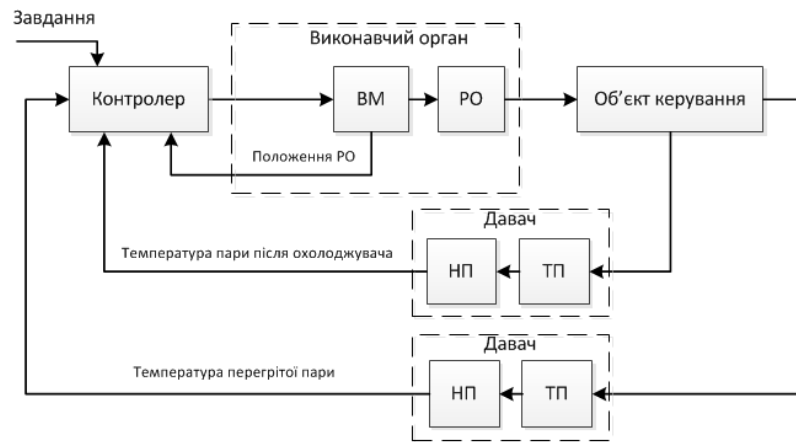


Рис. 3.2 Локальний рівень керування температурою пари

Система диспетчерського керування інтегрується в єдиний програмно-апаратний комплекс, який забезпечує централізовану візуалізацію та архівування параметрів, управління та контроль функціонування інженерних систем об'єкта із забезпеченням уніфікації технічних рішень, мінімізації номенклатури технологічного обладнання, матеріалів та програмного забезпечення.

Система забезпечує виконання наступних функцій:

- збір і введення в контролер локального рівня інформації про параметри, стан і режими роботи технологічного обладнання контуру температури пари;
- формування, введення та запис в пам'ять контролерів даних, які враховують індивідуальні особливості технологічного обладнання та задають гранично допустимі значення параметрів і режимів його функціонування;
- обробка інформації про параметри, стан та режими роботи технологічного обладнання по заданих алгоритмах та критеріях, формування подій, відповідних виходу значень параметрів за задані гранично допустимі рівні;

- передача та візуалізація на моніторі АРМ диспетчера поточної інформації про параметри, стан та режими роботи технологічного обладнання та про вид порушення, що викликало спрацьовування захистів;
- формування бази даних системи, реєстрація в ній поточних значень параметрів, станів і режимів роботи устаткування і подій;
- візуалізація на моніторі АРМ диспетчера історичної інформації, що зберігається в базі даних і її документування та архівація.

Програмне забезпечення (ПЗ) АРМ диспетчера функціонує в середовищі операційної системи Microsoft Windows 10. В основі ПЗ лежить середовище розробки та виконання SCADA-системи промислового призначення MasterSCADA-MSRT100.

Основні компоненти інтегрованої SCADA-системи:

- програмне забезпечення для формування та управління базою даних;
- користувацький інтерфейс для наочної візуалізації параметрів технологічних процесів та управління ними диспетчером;
- інструменти автоматичного ведення архіву параметрів, подій та дій диспетчера;
- засоби автоматичного запису трендів обраних параметрів;
- аудіовізуальні системи сигналізації аварійних повідомлень;
- комплексні засоби для розробки та налагодження ПЗ.

Функціональні можливості ПЗ для формування та управління базою даних:

- накопичення архівної інформації (трендів) для всіх фізичних точок контролю та управління без обмежень;
- автоматичний запис усіх дій оператора в архів;
- гнучка фільтрація записів за часовими та текстовими критеріями;
- перегляд архівної інформації у вигляді графіків та таблиць;
- експорт бази даних у формати, сумісні з поширеними СУБД та електронними таблицями.

Функціональні можливості користувацького інтерфейсу системи автоматичного керування:

- відображення інформації з контролера локального рівня на екрані АРМ диспетчера у зручній та зрозумілій формі, з можливістю керування системою;
- візуалізація даних за допомогою мнемонічних схем, графіків, трендів, гістограм, анімацій та інших елементів у реальному часі;
- видача аварійних повідомлень про нештатні режими роботи, параметри за межами допуску у вигляді спливаючих вікон, виділення несправних елементів миготінням, кольором та звуковими сигналами в реальному часі;
- введення керуючих впливів диспетчером за допомогою клавіатури або миші з мінімальними часовими витратами;
- відсутність програмних обмежень на розмір, форму, кількість або глибину вкладень елементів інтерфейсу користувача.

3.2. Програмно-алгоритмічний модуль системи автоматизованого регулювання температури пари

Зведена схема функціонування адаптивної системи автоматичного регулювання температури пари на промисловому обладнанні показана на рис.

3.3. У її структурі виділяють три окремі складові, кожна з яких є функціональним блоком елементів, що разом формують адаптивну систему керування.

Основою системи автоматичного регулювання температури пари виступає каскадна схема з регуляторами, які містять внутрішні моделі відповідних частин об'єкта. Об'єктом керування є ділянки паропроводів із теплообмінними поверхнями. Для внутрішнього швидкодіючого контуру таким об'єктом є камера пароохолоджувача зі встановленим за нею датчиком температури, тоді як для зовнішнього контуру — пароперегрівач.

Регулятор внутрішнього контуру включає керуючу ланку $W_{P1}(z)$, модель випереджального елемента $W_{ВППМ}(z)$ та компенсатор збурень $W_{PK}(z)$. Крім того, до внутрішнього контуру адаптивної системи входить селектор, який у потрібний момент активує відповідне джерело керуючого впливу на виконавчий механізм. Ним може бути безпосередньо регулятор або зовнішні для системи автоматичного регулювання сигнали, що надходять від алгоритмів ідентифікації та адаптації $\Delta u_1(t)$ та $\Delta u_1(t)$.

Температура пари утримується на заданому рівні за допомогою коригувального регулятора, до складу якого входить модель інерційної частини об'єкта з урахуванням динаміки внутрішнього контуру. Оскільки алгоритми керування працюють у дискретному режимі, а регулятори реалізовані у цифровій формі з періодом квантування, прийнято умову, що дозволяє уникнути втрати інформації між моментами дискретизації сигналу.

Важливою складовою системи автоматичного керування, яка виходить за межі традиційної структури САК, є матриця режимів. Вона містить набір визначених параметрів об'єкта та відповідні їм налаштування регуляторів залежно від режиму функціонування теплового агрегату.

Ідентифікація, як складова загального алгоритму роботи системи автоматичного керування, включає кілька функціональних блоків і потребує дотримання певних умов для свого виконання. До сукупності вимог, що дають змогу розпочати процедуру ідентифікації, належать:

- відсутність ризику виникнення аварійної ситуації, що забезпечується перебуванням технологічних параметрів у допустимих межах;
- стабільність навантаження теплового агрегату;
- режим роботи теплового агрегату, для якого ще не визначено параметри моделі, або ж наявність незадовільних показників якості роботи системи автоматичного керування, чи прийняте оператором рішення про запуск процедури ідентифікації.

Виконання вказаних умов активізує алгоритм ідентифікації, якій оцінює параметри моделей випереджаючої ланки та об'єкта в цілому по реакції на

тестове збурення . По результатам роботи алгоритму формується вектор параметрів моделей, де індекс відповідає -му режиму роботи теплового агрегату:

$$\bar{P}_i = [K_{OБМi}, T_{OБМi}, \tau_{OБМi}, K_{ВИПМi}, T_{ВИПМi}, \tau_{ВИПМi}] \quad (3.1)$$

Перед внесенням в матрицю режимів кожний параметр моделі проходить процедуру верифікації

$$p_{ij} \in [p_{ij \min}; p_{ij \max}], j = 1 \dots 6, \quad (3.2)$$

Граничні значення параметрів встановлюються під час впровадження системи автоматичного керування температурою пари. Після верифікації сформований набір параметрів включається до матриці режимів і надалі використовується для оперативної адаптації системи залежно від навантаження теплового агрегату. Такий підхід забезпечує захист системи керування від потенційно аварійних налаштувань регуляторів.

Фінальним етапом налаштування системи є оптимізація, яка передбачає підбір параметрів регуляторів під заданий критерій якості. Як критерій застосовується інтегральне середньоквадратичне відхилення технологічної змінної від заданого значення. Оптимізація виконується за умови постійного навантаження, тобто у стаціонарному режимі роботи системи. Під час подавання активних тестових збурень (приблизно $\pm 10\%$ від номінального положення виконавчого механізму) на вхід регулятора, що моделює зовнішній вплив, реєструється реакція системи та визначаються ключові показники якості для поточних параметрів.

Подальший вибір нового параметра налаштування здійснюється методом оптимального параметричного синтезу із застосуванням пошукових алгоритмів. Перед використанням отримані значення проходять перевірку на правдоподібність, аналогічну до верифікації параметрів ідентифікованої моделі. Межі правдоподібності визначаються фізичним змістом параметрів та характеристиками конкретного об'єкта керування.

Паралельно з визначенням оптимальних налаштувань регуляторів розраховуються параметри компенсатора збурень, у формування яких входить, зокрема, параметр фільтра регулятора внутрішнього контуру.

Незалежно від поточного режиму функціонування система автоматичного керування безперервно контролює, чи перебуває температура пари у допустимому діапазоні. Якщо значення виходить за встановлені межі, активується режим «Аварія». Реакція на таку ситуацію визначається режимом роботи системи. Так, під час звичайного регулювання температури спрацьовує світло-звукова сигналізація. Якщо ж аварія виникає в процесі ідентифікації або оптимізації, відповідна процедура негайно переривається, параметри регуляторів повертаються до значень, що діяли перед її початком, контури керування замикаються, а регулятори намагаються повернути технологічні змінні в допустимі межі.

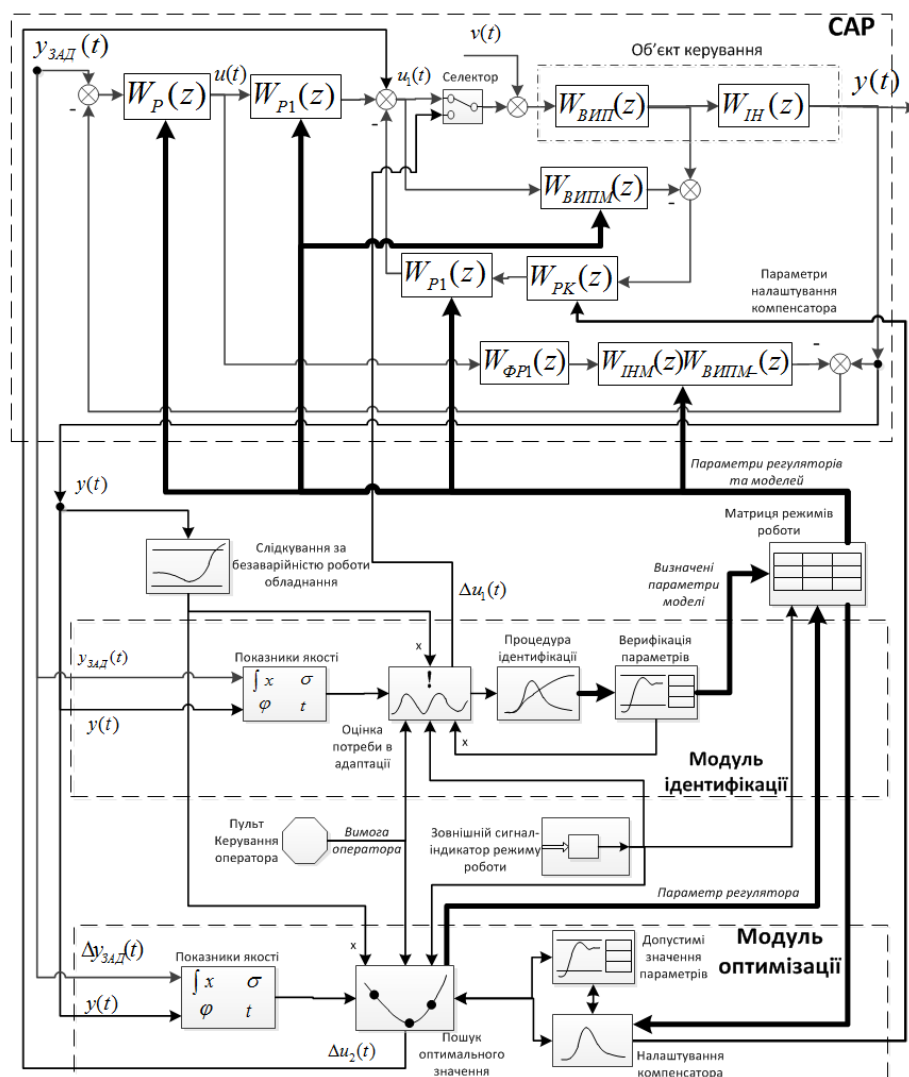


Рис. 3.3 Структура реалізації адаптивної системи автоматичного керування температурою пари

Узагальнений алгоритм роботи системи автоматичного керування температурою пари подається як послідовність операцій із перетворення вхідних даних, отриманих від температурних сенсорів, з метою формування керуючого сигналу для виконавчого механізму (рис. 3.4).

Фізично вимірний параметр (температура пари у діапазоні 4–20 мА) спершу проходить через фільтр, де електричний сигнал перетворюється у відповідне фізичне значення температури. Наприклад, для температури перегрітої пари на виході з теплообмінника значенню 12 мА відповідає температура 545 °С. Окрім цього, фільтр забезпечує захист від промислових завод та компенсує систематичну похибку вимірювання шляхом корекції градууювальної характеристики відносно нульової точки.

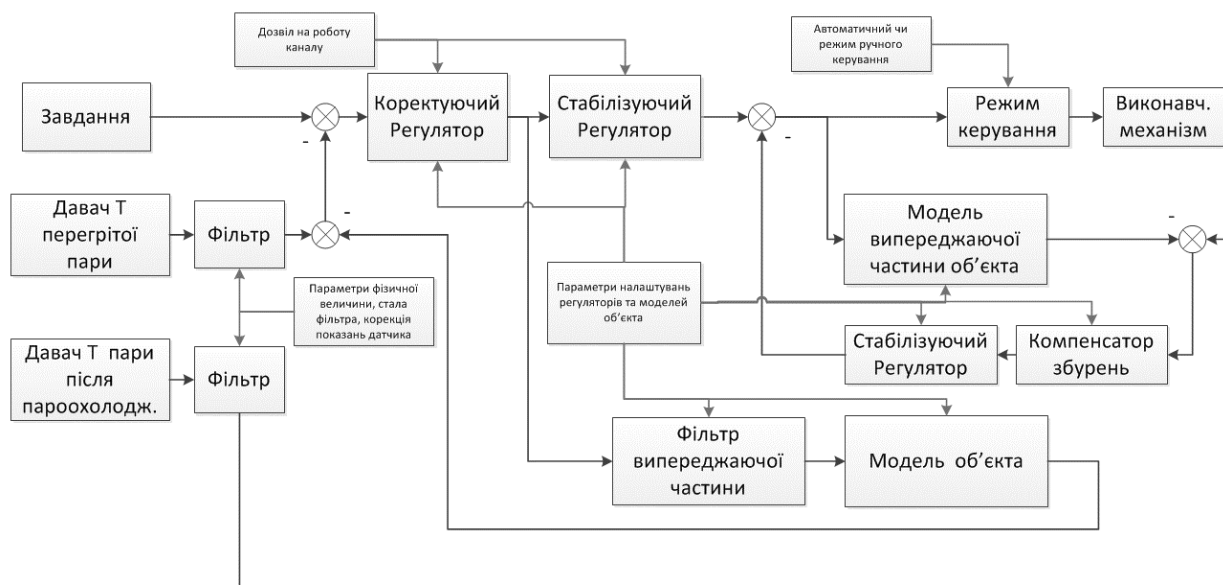


Рис. 3.4. Структура каналу керування температурою пари

На суматор коригувального регулятора подаються різниця між фактичною величиною параметра та його прогнозованим значенням (визначеним за моделлю об'єкта), а також уставка (задане значення). Вихід коригувального регулятора надходить на вхід стабілізуючого регулятора, який формує внутрішній контур керування, а також на модель інерційної частини

об'єкта з урахуванням динаміки цього внутрішнього контуру (фільтр випереджувальної дії).

Сигнал зі стабілізуючого регулятора через суматор передається до блоку вибору режиму, що визначає напрям руху виконавчого механізму для мінімізації похибки регулювання. Інший сигнал, який подається на суматор, є від'ємним значенням послідовного з'єднання виходу стабілізуючого регулятора та компенсатора збурень, що підвищує ефективність придушення зовнішніх впливів на систему. Таким чином, внутрішній контур містить регулятор із двома ступенями свободи.

Канал керування температурою пари може працювати як в автоматичному режимі під керуванням регулятора, так і в ручному режимі, коли виконавчим механізмом управляє оператор. Положення виконавчого механізму в ручному режимі задається через систему меню. Вибір режиму роботи визначається станом блоку «Автоматичний чи ручний режим керування» і впливає на роботу блоку «Режим керування», де відбувається остаточне перетворення сигналу регулятора у форму, зрозумілу виконавчому механізму.

На рис. 3.5 показано реалізацію аперіодичної ланки першого порядку, яка використовується для побудови моделі об'єкта керування каналу регулятора. Аперіодична ланка першого порядку складається з елементарних математичних блоків і реалізована у дискретній формі, що залежить від періоду квантування контролера (вхід «ТИК»). Для додаткового управління передбачене примусове відключення ланки через вхід «Сброс» (наприклад, у разі зупинки системи керування).

Алгоритм ідентифікації (рис. 3.6) включає кілька етапів: перевірку можливості ідентифікації, оцінку необхідності її проведення, безпосередню процедуру визначення параметрів моделі та перевірку отриманих результатів на адекватність. Ідентифікація параметрів здійснюється методом аналізу початкової ділянки перехідного процесу після прикладання ступінчастого збурення амплітудою 5–10% повного ходу виконавчого механізму,

підключеного до виходу стабілізуючого регулятора. При цьому система керування розмикається, щоб виключити вплив зворотного зв'язку на результати процедури.

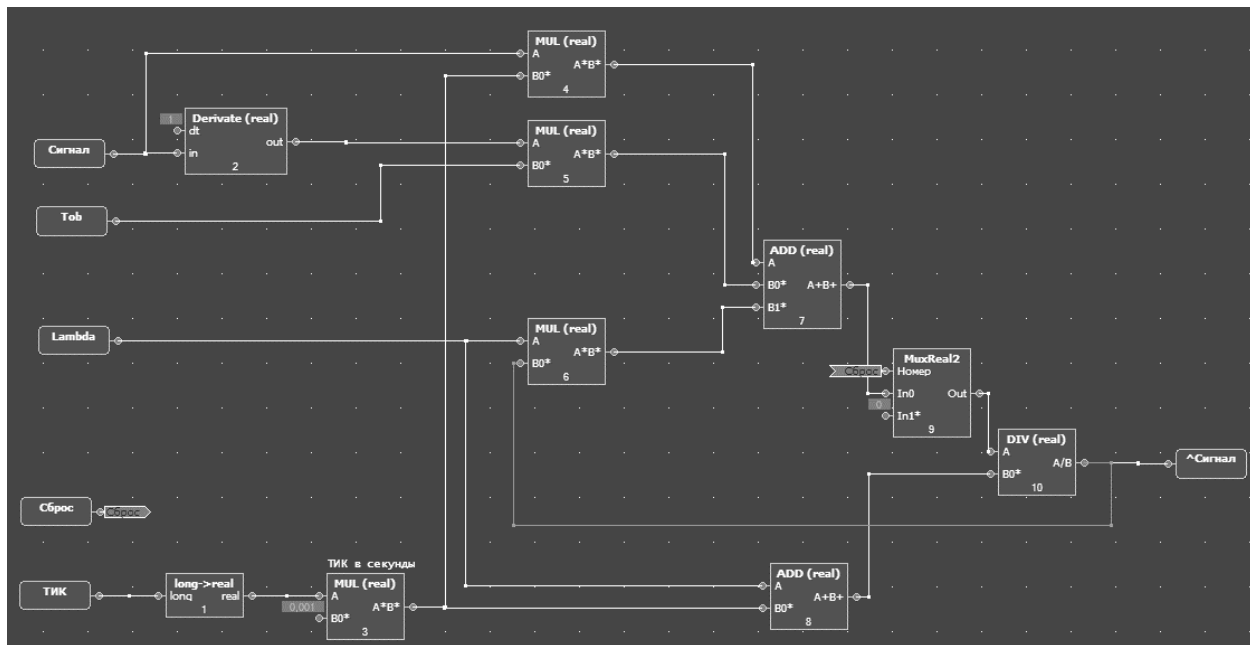


Рис. 3.5 Реалізація інерційної ланки першого порядку на мові FBD

Умовами проведення ідентифікації є забезпечення стаціонарного режиму роботи теплового агрегату та відсутність чи маловпливовість діючих зовнішніх збурень на зміну температури первинної пари на виході теплового агрегату:

$$p_{ij} \in [p_{ij \min}; p_{ij \max}], j = 1 \dots 6, \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} N = const \\ |e(t)| \leq \delta, t \geq t_{cn} \\ |e_1(t)| \leq \delta_1, t \geq t_{cn} \end{cases} \quad (3.3)$$

де N - поточне навантаження теплового агрегату, $e(t)$, $e_1(t)$ - похибки керування основної та випереджаючої технологічних змінних, δ , δ_1 - зона нечутливості, t_{cn} - час спостереження за динамікою контуру керування температури.

Автоматизований алгоритм ідентифікації доцільно застосовувати у тих випадках, коли, окрім виконання попередньо визначених умов, що дозволяють проведення ідентифікації, спостерігається зниження ефективності роботи системи або погіршення ключових показників її регулюючих властивостей:

$$\left[\begin{array}{l} |e(t)| > e_{\max}, t \geq t_{e\max} \\ I = \int_{t_n}^{t_k} e^2(t) dt > I_{\max}, t \geq t_{I\max} \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Основними показниками якості системи, з урахуванням особливостей об'єкта керування та вимог до його функціонування, є: динамічне відхилення, яке не повинно перевищувати допустиме значення протягом заданого проміжку часу, та середньоквадратичне відхилення, визначене за допомогою ковзного інтеграла на певному часовому інтервалі.

У разі порушення хоча б однієї з цих умов запускається процедура ідентифікації. Отримані результати проходять перевірку адекватності, а саме параметри моделей порівнюються з допустимими діапазонами значень для кожного параметра окремо.

По результатам роботи алгоритму формується вектор \bar{p}_i параметрів моделей, де індекс i відповідає i -му режиму роботи теплового агрегату:

$$\bar{p}_i = [K_{ОБМі}, T_{ОБМі}, \tau_{ОБМі}, K_{ВИПМі}, T_{ВИПМі}, \tau_{ВИПМі}] \quad (3.5)$$

Кожна складова вектору параметрів моделей \bar{p}_i проходить перевірку адекватності шляхом її порівняння з дозволеним діапазоном значень по кожному параметру окремо

$$p_{ij} \in [p_{ij\min}; p_{ij\max}], j = 1 \dots 6, \quad (3.6)$$

де $p_{ij\min}$, $p_{ij\max}$ - мінімально та максимально допустимі значення для кожного параметру моделей відповідно.

Порушення будь-якого з параметрів умови адекватності призводить до анулювання результатів експерименту та виводу відповідного повідомлення. Одночасно з процесом ідентифікації працює окрема алгоритмічна ланка, яка

контролює безпечну роботу контуру керування температурою пари і зупиняє експеримент у разі виходу контрольованих змінних за допустимі межі.

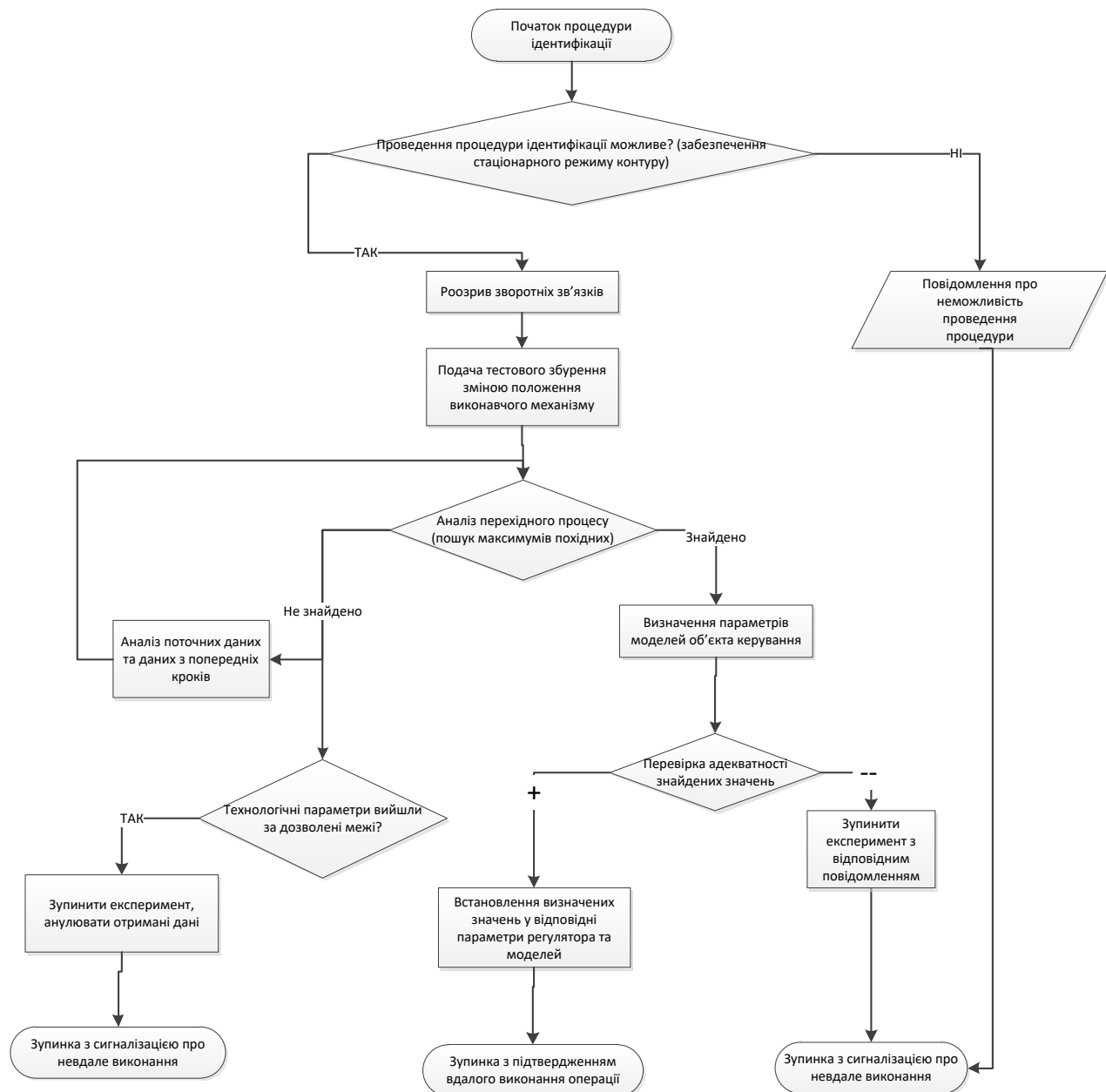


Рис. 3.6 Блок-схема алгоритму ідентифікації

Якщо в матриці режимів немає оптимальних для поточного режиму роботи теплового агрегату значень, початкові параметри налаштувань регуляторів визначаються із наступних виразів:

$$\begin{aligned} \lambda &= 0,3 \dots 0,6 \tau_{ОБМ} \\ \lambda_1 &= 0,3 \dots 0,6 \tau_{ВИПМ} \\ \alpha &= -T_{ВИПМ} \cdot \left[e^{\frac{\tau_{ВИПМ}}{T_{ВИПМ}}} \cdot K_{ОБМ} \left(-\frac{\lambda_1}{T_{ВИПМ}} + 1 \right) \left(-\frac{\varepsilon}{T_{ВИПМ}} + 1 \right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Оптимізація параметрів здійснюється методом оптимального параметричного синтезу. Процес налаштування включає такі етапи: подачу тестового збурення у вигляді східчастого сигналу; визначення критерію якості: інтегрального критерію мінімуму квадратичної похибки регулювання; встановлення нового значення параметра на основі результатів роботи блока «Оптимізація параметрів». Ітераційний процес пошуку оптимального значення параметра припиняється при виконанні наступної умови:

$$\frac{|I^{(n)} - I^{(n-1)}|}{I^{(n)}} 100\% \leq \varepsilon_{\zeta}, \quad (3.8)$$

де n - номер кроку пошукового алгоритму, $I^{(n)}$ - величина критерію якості на поточному кроці, $I^{(n-1)}$ - величина критерію якості на попередньому кроці, ε_{ζ} - наперед задана величина.

Такий вигляд умови зупинки дозволяє оперувати відносними значеннями критеріїв якості і не вимагає апріорних знань про порядок цих величин, на відміну від звичної умови вигляду $|I^{(n)} - I^{(n-1)}| \leq \varepsilon_3$, де порядок величин істотно впливав на значення ε_3 .

Метод оптимального параметричного синтезу характеризується простотою впровадження у системах автоматичного керування будь-якої складності та здатністю ефективно розв'язувати задачу мінімізації критерію оптимальності, що забезпечує підвищення якості керування.

Дослідження впливу початкового значення сталої часу фільтра $\lambda_{Поч}$ в складі регулятора показали, що оптимальним є значення $\lambda_{Поч} = 2\tau_{ОБМ}$. У цьому випадку система має значний запас стійкості та забезпечує якісний перехідний процес при точному визначенні параметрів моделі.

Отже, використовуючи формалізовані алгоритми оптимізації та ідентифікації, можна автоматизовано виконати налаштування системи автоматичного керування для забезпечення заданих показників якості.

Через нестационарність пароперегрівача як об'єкта автоматичного керування протягом тривалого періоду експлуатації час від часу виникає потреба в уточненні параметрів моделей об'єкта та налаштувань регуляторів. У [21] запропонована методика визначення оптимального інтервалу повторення процедури ідентифікації, що дозволяє запобігти погіршенню якості роботи системи автоматичного керування внаслідок конструктивних особливостей теплового агрегату, зокрема забруднення поверхонь нагріву.

$$T_{\text{ВКЛ}}^{\text{ОПТ}} = \sqrt{\frac{T_a^2 (\varphi - \varphi_0) + 2T_a D_a}{\varphi - \varphi_0}}, \quad (3.9)$$

де T_a - середній час, необхідний для виконання процедури адаптації; D_a - додаткове збільшення дисперсії регульованої величини під час проведення експерименту, φ , φ_0 - середні швидкості зміни дисперсії регульованої змінної без адаптації та при ідеальній адаптації відповідно.

Рекомендований період включення другого рівня адаптації для уточнення параметрів моделі та налаштування регуляторів складає 900 – 1700 годин в залежності від переважного режиму роботи теплового агрегату.

Прикладне програмне забезпечення (ППЗ) супервізорного рівня функціонує на базі операційної системи Microsoft Windows. Ключовими елементами ППЗ є OPC-сервер збору та первинної обробки даних та SCADA-система для реалізації функцій верхнього рівня автоматизації (рис. 3.7). MasterSCADA - сучасний SCADA-пакет, в якому реалізована сукупність засобів і методів, що забезпечують різке скорочення трудовитрат і підвищення надійності створюваної системи. MasterSCADA є повнофункціональним SCADA і SoftLogic модульним пакетом програм з розширюваною функціональністю. Пакет побудований за клієнт-серверною архітектурою та може працювати як у локальних мережах, так і через Інтернет. Його концепція базується на єдиному середовищі розробки АСУТП, що дозволяє об'єднати в

одному програмному продукті більшість необхідних функцій, вирішувати проблеми сумісності різних пристроїв системи, перерозподіляти сигнали та алгоритми їх обробки між окремими пристроями, створювати розподілені алгоритми контролю та управління, а також забезпечує доступ до будь-якої інформації системи з будь-якого робочого місця.



Рис. 3.7 Структура прикладного програмного забезпечення

SCADA-проект запускається автоматично під час увімкнення комп'ютера. Якщо автоматичний запуск не відбувся, програму можна запустити вручну. Для цього потрібно двічі клацнути лівою кнопкою миші на піктограмі диспетчерської програми, розташованій на робочому столі Windows. Після цього програма почне роботу.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено структуру системи автоматичного керування температурою пари та здійснено розподіл функцій відповідно до прийнятої дворівневої ієрархії. На нижньому рівні розміщена локальна автоматика з програмованим контролером та засобами зв'язку з об'єктом, а на верхньому — система диспетчерського керування. Виконано підбір апаратної та програмної платформи, що відповідає поставленим вимогам і забезпечує реалізацію розроблених алгоритмів керування.

2. Розроблено методику налаштування системи автоматичного керування температурою пари, яка охоплює: налаштування регуляторів, оцінку параметрів моделей, корекцію параметрів системи відповідно до поточного режиму роботи теплового агрегату, а також періодичну корекцію налаштувань з урахуванням зміни динамічних характеристик пароперегрівача під час експлуатації.

3. Технічно реалізовано алгоритми регулювання температури первинної пари за допомогою регуляторів з внутрішньою моделлю. Автоматизовано алгоритми ідентифікації параметрів моделей об'єкта керування та оптимізації налаштувань регуляторів, забезпечено їх взаємодію в складі системи автоматичного керування температурою.

4. Використання запропонованих рішень дозволяє зменшити кількість аварійних відключень шляхом запобігання виходу температури пари за допустимі межі, подовжити розрахунковий термін служби поверхонь нагріву та суміжного обладнання, що підвищує ефективність роботи теплового агрегату.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Вступ

Розвиток науки й техніки у сучасний період зумовлює впровадження принципово нових рішень майже в усіх галузях промисловості, що суттєво трансформує технологічні процеси та обладнання, яке використовується у виробництві. Відповідно, зміни технологій та технічних засобів спричиняють зміну умов праці та змісту трудової діяльності працівників. Тому під час розроблення й впровадження нового технологічного устаткування необхідно здійснювати всебічний аналіз можливих шкідливих і небезпечних виробничих факторів та визначати заходи для мінімізації їх негативного впливу на працівників [39].

Головною метою системи охорони праці на підприємствах є створення безпечних умов праці, забезпечення надійної та безпечної експлуатації технологічного обладнання, а також істотне зменшення або повне усунення дії небезпечних і шкідливих факторів, що спричиняють виробничий травматизм та професійні захворювання [40].

Законодавство України у сфері охорони праці ґрунтується на гарантованому статтею 43 Конституції України праві громадян на безпечні та здорові умови праці. Базовими є нормативні акти, дії яких поширюється на всі підприємства, установи та організації незалежно від форми власності та виду діяльності, а також на всіх громадян, які на них працюють:

- Закон України «Про охорону праці», що визначає загальні положення щодо організації безпечних умов праці, встановлює права та обов'язки роботодавця і працівників, а також механізми управління охороною праці.
- Кодекс цивільного захисту України, який регламентує заходи запобігання аваріям, ліквідації надзвичайних ситуацій, забезпечення пожежної та техногенної безпеки.

- Закон України «Про пожежну безпеку», що встановлює вимоги до запобігання пожежам, дій персоналу в разі їх виникнення і забезпечення протипожежного захисту.

- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», спрямований на регулювання діяльності, що впливає на стан водних, земельних, атмосферних ресурсів, а також контроль за викидами та відходами.

У роботі теплоенергетичних об'єктів застосовуються спеціальні галузеві нормативи:

- Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж;
- Правила будови і безпечної експлуатації парових і водогрійних котлів.

Надзвичайні ситуації класифікуються за кількома ключовими ознаками [39]:

- за галузевою ознакою;
- за масштабами можливих наслідків.

Згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 368 від 24.03.2004 р. «Про затвердження Порядку класифікації надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру за їх рівнями», основою для класифікації надзвичайних ситуацій є рівень їх негативних наслідків, а також обсяг технічних та матеріальних ресурсів, необхідних для ліквідації цих наслідків. Відповідно, виділяють надзвичайні ситуації техногенного, природного та військового характеру, а також деякі інші спеціалізовані категорії.

Для ефективного запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного або природного характеру в Україні створена Єдина державна система запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру. Ця система інтегрує центральні та місцеві органи виконавчої влади, виконавчі органи місцевих рад, державні підприємства, установи та організації, які мають відповідні сили і матеріальні ресурси. Основними завданнями системи є нагляд за дотриманням норм техногенної та природної безпеки, організація робіт із запобігання можливим надзвичайним

ситуаціям, а також оперативне реагування у разі їх виникнення. Головною метою є захист населення та навколишнього середовища від негативного впливу надзвичайних ситуацій, а також мінімізація матеріальних збитків.

До основних заходів у сфері захисту від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру належать [40]:

- інформування та оповіщення населення про загрозу або настання надзвичайної ситуації;
- систематичне спостереження за розвитком ситуації;
- укриття населення у спеціально обладнаних захисних спорудах;
- евакуація населення із зони ураження;
- застосування інженерних, медичних та біологічних заходів захисту;
- у разі необхідності — використання засобів радіаційного та хімічного захисту.

Таким чином, організація та функціонування системи запобігання і реагування на надзвичайні ситуації спрямовані на комплексний захист життя, здоров'я та майна населення, а також на мінімізацію шкоди для довкілля та економіки країни.

4.1. Науково-методичні засади аналізу виробничого середовища теплоенергетичних систем

4.1.1. Загальна характеристика виробничого середовища

Теплоенергетичні об'єкти (котельні, теплогенератори, ТЕЦ, теплонасосні станції, системи теплопостачання) функціонують у складних умовах високотемпературних та високонапірних процесів, що зумовлює формування виробничого середовища зі значною концентрацією небезпечних факторів. Наукові дослідження свідчать, що рівень небезпек у теплоенергетиці корелює з потужністю основного технологічного обладнання, ступенем автоматизації виробничих процесів та якістю технічної експлуатації.

Виробниче середовище теплоенергетичних систем формується такими ключовими параметрами:

- температурою теплоносія та поверхонь обладнання (до 180–540 °С залежно від типу системи);
- тиском у трубопроводах (у парових системах досягає 1,6–14 МПа);
- рівнем шуму (70–95 дБ у насосних станціях, 85–105 дБ біля котлів високого тиску);
- параметрами мікроклімату (підвищена вологість, локальні перегріву);
- концентрацією шкідливих газів (CO, SO₂, NO_x, пил).

З фізико-технічної точки зору такі умови формують комплекс небезпечних виробничих факторів, дія яких у разі відсутності системного контролю призводить до деградації обладнання, підвищення аварійності та виникнення ризиків для персоналу.

4.1.2. Класифікація небезпечних та шкідливих чинників

Наукова класифікація факторів безпеки на теплоенергетичних об'єктах включає:

1) Фізичні фактори:

- підвищена температура поверхонь і повітря робочої зони,
- надлишковий тиск у трубопроводах і резервуарах,
- високий рівень шуму, інфразвук та вібрація,
- електричні та електромагнітні поля,
- недостатня освітленість.

2) Хімічні фактори:

- токсичні компоненти продуктів згоряння,
- корозійно-активні середовища (аміак, кислоти, луги у водопідготовці),
- запиленість та аерозолі.

3) Пожежо - та вибухонебезпечні фактори:

- витік природного газу,
- вибухонебезпечність пилоповітряних сумішей,
- висока температура полум'я та розпечених поверхонь,
- наявність легкозаймистих матеріалів у зоні обслуговування.

4) Психофізіологічні фактори:

- висока відповідальність оператора через безперервний режим роботи,
- стресові фактори під час аварійних режимів,
- монотонність процесів контролю та спостереження.

1.3. Наукові принципи оцінювання професійного ризику:

Аналіз професійного ризику базується на комплексі методів:

- експертних оцінок,
- функціонально-енергетичного аналізу аварій,
- вероятнісних підходів (метод Монте-Карло, FMEA, HAZOP),
- моделювання граничних станів обладнання,
- використання індексу потенційної небезпеки об'єкта.

Узагальнено ризик R визначається як добуток імовірності аварії P на величину можливих наслідків $R = P \cdot L$.

Для теплоенергетики характерні значення ризиків категорій середня та підвищена, що зумовлює необхідність системного управління безпекою праці.

4.1.3. Інженерно-технічні та організаційні засади охорони праці

Технічна безпека котельного та тепломеханічного обладнання.

Система технічної безпеки орієнтована на зниження аварійності та запобігання небезпечним станам обладнання. Основні науково-технічні вимоги включають:

Теплоізоляція і тепловий захист

Теплоізоляція трубопроводів та котлів базується на застосуванні мінеральноватних матеріалів, керамічних волокон і багат шарових структур. Зниження теплових втрат також покращує енергетичний баланс системи.

Автоматизація та диспетчеризація

Сучасні теплоенергетичні системи використовують:

- ПЛК-контролери (PLC),
- SCADA-системи,
- датчики температури, тиску, розрідження,
- газоаналізатори для CO і CH₄.

Автоматизовані системи дозволяють працювати у режимі предиктивного управління, зменшуючи ймовірність помилок оператора.

Контроль електробезпеки

Реалізуються:

- системи вирівнювання потенціалів,
- заземлення та занулення,
- реле диференційного струму,
- теплові захисти двигунів,
- захисні розчіплювачі.

Електротехнічні засоби проходять періодичні випробування відповідно до галузевих стандартів.

Системи вентиляції, мікроклімату та очищення повітря

Наукові принципи оцінювання мікроклімату базуються на тепловому балансі людини в робочому середовищі. Для забезпечення нормативних умов застосовують:

- приточно-витяжні вентиляційні установки,
- локальні відсмоктувачі,
- фільтрувальні агрегати (електрофільтри, циклонні системи),
- системи аспірації пилу.

Механізми очищення газоповітряних потоків включають коагуляцію частинок у електричному полі, інерційне відділення, імпульсну фільтрацію.

Пожежна та вибухова безпека

Наукові засади протипожежного захисту включають:

- критерій самозаймання матеріалів,
- теплові моделі фронту полум'я,
- розрахунок надлишкового тиску вибуху.

Теплоенергетичні об'єкти обладнуються:

- системами водяного та пінного пожежогасіння,
- газовими установками (CO₂, FM-200),
- датчиками полум'я та диму,

- автоматичними клапанами надлишкового тиску.

Організаційні заходи управління охороною праці

Організаційні заходи включають:

- багаторівневі інструктажі (вступний, первинний, цільовий),
- періодичний медичний контроль персоналу,
- атестацію робочих місць за умовами праці,
- регулярні аудити та перевірку знань,
- розробку планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС),
- оцінку компетентності персоналу відповідно до міжнародних стандартів технічної експлуатації.

4.4. Екологічна безпека теплоенергетичних об'єктів

Атмосферні викиди: структура, вплив, методи мінімізації

Викиди теплоенергетичних систем характеризуються багатокомпонентністю. Типові концентрації:

Компонент	Характер впливу	Джерело
CO ₂	парниковий ефект	згорання палива
CO	токсичність	неповне згорання
NO _x	кислотні дощі	високотемпературне горіння
SO ₂	кислотні дощі, корозія	сірчисте паливо
Пил	канцерогенність	тверді частки золи

Наукові методи зниження викидів включають:

- селективну некаталітичну та каталітичну нейтралізацію NO_x,
- вапнякову абсорбцію SO₂,
- електростатичну коагуляцію частинок,
- низькотемпературні режими горіння.

Теплове забруднення та охорона водних ресурсів

Теплоенергетичні об'єкти застосовують системи:

- оборотного водокористування,
- градирні та вентиляторні охолоджувачі,
- флотатори та коагуляційні установки.

Очищення стічних вод включає:

- механічну очистку (сита, пісковловлювачі),
- фізико-хімічну (коагуляцію, флотацію),
- хімічну (нейтралізацію кислот і лугів),
- сорбційну та мембранні технології.

Утворення та поводження з відходами

Відходи теплоенергетики поділяють на:

- **золу та шлак** — можуть використовуватись у будівництві як добавки в цемент;
- **відходи реагентів водопідготовки** — класифікуються як небезпечні;
- **відпрацьовані мастила** — потребують регенерації або передачі спеціалізованим підприємствам.

Впроваджуються технології безвідходного спалювання, сухого вилучення золи, пневмотранспорту шлаків.

Система екологічного моніторингу

Моніторинг виконується за такими напрямками:

1. Контроль атмосферних викидів

Здійснюється безперервне вимірювання CO, NO_x, SO₂, O₂, пилу.

2. Контроль водних ресурсів

Визначаються БСК, ХСК, концентрації нафтопродуктів, завислих речовин.

3. Акустичний та вібраційний моніторинг

Проводиться в санітарно-захисній зоні.

4. Ґрунтово-екологічний аналіз

Включає оцінку кислотності, вмісту важких металів і радіонуклідів.

4.5. Запобігання надзвичайних ситуацій на теплоенергетичних об'єктах

Запобігання надзвичайним ситуаціям на теплоенергетичних об'єктах є комплексом організаційних, технічних та технологічних заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків аварій, вибухів, пожеж, ушкодження обладнання та негативного впливу на персонал і навколишнє середовище. Особливості роботи теплових електростанцій, котельень та теплових мереж зумовлюють необхідність постійного контролю технологічних параметрів, стану обладнання та дотримання вимог безпеки на всіх етапах виробництва, транспортування і постачання теплової енергії.

4.5.1. Організаційно-технічні заходи

Система управління безпекою:

- Розроблення та впровадження політики безпеки виробництва.
- Проведення періодичних аудитів техногенної безпеки.
- Визначення відповідальних осіб за експлуатацію обладнання та реагування на аварійні ситуації.

Підготовка та навчання персоналу:

- Регулярні інструктажі з охорони праці та протиаварійних дій.
- Підготовка операторів та інженерного персоналу до роботи з високотемпературними і високотисковими системами.
- Тренування взаємодії персоналу з аварійно-рятувальними службами.

Підтримання нормативно-технічної документації:

- Оновлення інструкцій, регламентів, планів локалізації і ліквідації аварій.
- Ведення журналів технічного стану обладнання та обліку інцидентів.

4.5.2. Технічні заходи безпеки

Системи автоматичного контролю та захисту:

- Встановлення автоматичних засобів регулювання температури, тиску та рівня води в котлах і теплообмінниках.
- Наявність аварійних клапанів, запобіжних заслінок, реле тиску та аварійного відключення.

Моніторинг технічного стану обладнання:

- Регулярна діагностика трубопроводів, котлів, турбін, насосів та арматури.
- Використання неруйнівних методів контролю (ультразвук, термографія, віброаналіз).
- Планово-попереджувальні ремонти згідно з регламентом.

Пожежна та вибухова безпека:

- Обладнання об'єктів автоматичними системами пожежогасіння та димовидалення.
- Контроль герметичності газових магістралей.
- Забезпечення належного заземлення й захисту від статичної електрики.

4.5.3. Технологічні заходи

Стабільність параметрів теплового процесу:

- Недопущення перегріву теплоносія, різких перепадів температури та тиску.
- Оптимізація режимів згоряння в котлах для запобігання утворенню вибухонебезпечних газів.

Контроль водно-хімічного режиму:

- Підтримання необхідної якості води для запобігання корозії та накипу.
- Автоматизація систем очищення, деаерації та пом'якшення.

Безпечна експлуатація теплових мереж:

- Регулярне випробування трубопроводів на щільність та міцність.
- Використання компенсаторів для запобігання температурним деформаціям.

- Своєчасна заміна застарілих та аварійних ділянок мереж.

4.5.4. Організація оперативно-аварійного реагування

Планування дій у надзвичайних ситуаціях:

- Розробка планів аварійної зупинки обладнання.
- Чіткі схеми сповіщення персоналу та служб реагування.

Створення аварійно-ремонтних формувань:

- Оснащення мобільних бригад необхідним інструментом та засобами індивідуального захисту.
- Постійна готовність ремонтного персоналу до ліквідації пошкоджень.

Засоби індивідуального та колективного захисту:

- Забезпечення персоналу протипожежними костюмами, касками, захисними окулярами, апаратами на стисненому повітрі.
- Обладнання укриттів та безпечних зон на території об'єкта.

4.5.5. Екологічна безпека та моніторинг

Контроль викидів та стану довкілля:

- Постійний моніторинг концентрації шкідливих речовин в атмосферу.
- Встановлення систем очищення димових газів.

Запобігання тепловому забрудненню:

- Раціональне використання охолоджувальної води.
- Використання оборотних систем водопостачання.

Управління відходами:

- Своєчасне видалення золи, шлаків та інших технологічних відходів відповідно до екологічних норм.

4.5.6. Підвищення надійності та модернізація

Впровадження сучасних систем автоматизації:

- Використання сучасних SCADA-систем, датчиків, засобів дистанційного моніторингу.

Реконструкція застарілого обладнання:

- Заміна котлів, турбін, насосного парку, що вичерпали свій ресурс.
- Модернізація теплових мереж на основі нових матеріалів та технологій.

Підвищення енергоефективності:

- Оптимізація процесів з метою зменшення навантаження на обладнання та підвищення його довговічності.

Висновки до розділу 4

У результаті проведеного наукового аналізу встановлено, що забезпечення охорони праці, екологічної безпеки та запобіганню надзвичайних ситуацій на теплоенергетичних об'єктах є комплексним завданням, що потребує інтеграції інженерних, організаційних і природоохоронних рішень. Висока концентрація небезпечних виробничих факторів зумовлює необхідність застосування систем автоматизації, сучасних методів очищення викидів, а також побудови ефективної системи екологічного моніторингу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз функціонування теплового агрегату як об'єкта автоматичного регулювання температури пари. Встановлено характер впливу основних технологічних параметрів на зміну температури пари та обґрунтовано необхідність модернізації системи автоматичного керування для забезпечення належної якості регулювання в нестационарних режимах роботи котлоагрегату.

2. Досліджено структури адаптивних систем та методи автоматичного регулювання, визначено можливості їх застосування для контролю температури пари в тепловому агрегаті. Показано доцільність використання моделей об'єкта як складової частини законів керування.

3. Розроблено систему автоматичного регулювання температури пари, побудовану на послідовному з'єднанні регуляторів із внутрішньою моделлю. Регулятор випереджального контуру виконано з двома ступенями свободи. Застосування такої структури забезпечило практично аперіодичний характер перехідного процесу, скорочення часу регулювання на 45–50% та зниження інтегрального квадратичного критерію якості на 52% порівняно з типовими схемами керування.

4. Удосконалено метод ідентифікації параметрів моделі об'єкта керування на основі аналізу початкової ділянки перехідного процесу. Отримано аналітичні залежності для визначення коефіцієнта передачі та сталої часу об'єкта.

5. Запропоновано структуру системи автоматичного регулювання температури пари, яка передбачає рівень оперативної адаптації параметрів регуляторів залежно від поточного стану та режиму роботи теплового агрегату.

6. Впровадження розробленої системи автоматичного регулювання температури пари дозволяє зменшити кількість аварійних зупинок теплового агрегату, підвищити ресурс елементів поверхонь нагріву та допоміжного обладнання, що загалом покращує ефективність його експлуатації.

7. Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів показав, що під час використання системи автоматичного регулювання температури пари діють шкідливі фізичні, хімічні, пожежо – вибухонебезпечні, психофізіологічні фактори. Це потребує впровадження комплексу організаційних заходів управління охороною праці відповідно до сучасних норм та правил чинного законодавства.

8. Забезпечення техногенної безпеки на таких об'єктах потребує комплексного підходу, що охоплює технічні, організаційні та технологічні заходи. До головних напрямів профілактики надзвичайних ситуацій належать: постійний контроль параметрів обладнання, модернізація та автоматизація систем керування, підтримання справності тепломеханічного обладнання, розвиток систем раннього виявлення аварійних відхилень, наявність ефективних засобів протиаварійного захисту, а також дотримання персоналом вимог охорони праці та виробничої безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Басалкевич С. С. Автоматизована система керування гарячим водопостачанням котельної : магістр. кваліф. робота. — Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2024. — 98 с.
2. Beckhoff. Technical Documentation on TwinCAT Temperature Regulation. — Beckhoff Automation, 2021. — Режим доступу: <https://www.beckhoff.com>
3. Бойко П. Автоматизація технологічного комплексу котельної на базі ПЛК // Матеріали конф. ТЕФ-2022. — Львів : ЛП, 2022. — С. 114–118.
4. Бондарчук В. В. Автоматичне керування технологічними процесами. — Київ : Наукова думка, 2018. — 432 с.
5. Черненко Г. Г. Основи контролю і регулювання теплоенергетичних установок. — Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2018. — 244 с.
6. Черноусенко О. Ю. Атомні і теплові електростанції : курс лекцій. — Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2020. — 212 с.
7. ДСТУ EN 61511. Функціональна безпека систем керування для промислових процесів. — Київ : УкрНДНЦ, 2018.
8. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи менеджменту якості. Вимоги. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
9. EN 12953. Shell Boilers — Requirements for Safety and Control. — Brussels : CEN, 2012.
10. Ермілова Н., Кислиця С. Системи автоматичного регулювання параметрів у теплообмінниках // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2020. — № 3. — С. 32–38.
11. Гнатюк Р. Алгоритми оптимального регулювання температури теплоносія в котельних установках // Енергетика України. — 2023. — № 2. — С. 55–61.
12. ГОСТ 17.2.3.02-78. Котельні установки. Загальні технічні вимоги. — Москва : Стандартінформ, 1978.

13. Гринь П. О. Системи автоматизації технічних процесів. — Львів : ЛНУ, 2020. — 368 с.
14. IEC 61131-3. Programmable Controllers. — Geneva : IEC, 2013.
15. IEC 61298. Process Measurement and Control Instruments. — Geneva : IEC, 2017.
16. IEC 61508. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Systems. — Geneva : IEC, 2010.
17. Іваненко І. М. Автоматика та управління в енергетиці. — Харків : Факт, 2019. — 280 с.
18. IECON 2021. Advances in PID Temperature Regulation for Thermal Boilers // IEEE Confer. Proc. — 2021. — С. 1124–1130.
19. IFAC 2023. Industrial IoT Applications in Boiler Control Systems // IFAC Proc. — 2023. — С. 377–384.
20. IJTRE. Control of Boiler Operation Using PLC-SCADA // Int. J. of Technical Research and Engineering. — 2020. — № 8. — С. 12–18.
21. Jiang T. Thermal Process Control in Steam Systems. — Springer, 2022. — 290 p.
22. Jose A. Applications of PID in Boiler Automation // International Journal of Mechanical Engineering. — 2021. — № 5. — С. 88–95.
23. Journal of Thermal Engineering and Applications. PLC & SCADA-Based Automation in Boilers. — 2025. — № 1.
24. Journal of Thermal Engineering and Applications. Real-Time Automation of Boiler Arrangement Using PLC & SCADA. — 2025. — № 2.
25. Жовтоніжко Г. А. Система автоматизованого керування котельною установкою // Наук. праці ЧДТУ. — Черкаси : ЧДТУ, 2018. — С. 129–133.
26. Коваленко С. П. Електронні системи керування котельними установками. — Київ : Енергія, 2017. — 245 с.
27. Колесник І. А. Промислові системи контролю та керування : PLC, SCADA, НМІ. — Київ : Ліра, 2021. — 320 с.

28. Кошовий О. Автоматизація котельного обладнання на базі PLC Siemens : магіст. робота. — Львів : ЛП, 2023. — 102 с.
29. Krutz R. Industrial Automation and Process Control. — Wiley, 2022. — 340 p.
30. Ладанюк А. П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв. — Київ : Аграрна освіта, 2001. — 400 с.
31. Литвиненко А. М. Застосування PID-регуляторів у системах теплового контролю // Автоматизація і управління. — 2021. — № 4. — С. 73–81.
32. Марченко Т. С. Інтелектуальні системи контролю температури в енергетичних об'єктах // Системи керування. — 2023. — № 2. — С. 112–121.
33. Omega Engineering. PID Controllers : Technical Catalogue. — Omega Eng., 2020. — Режим доступу: <https://www.omega.com>
34. Ogata K. Modern Control Engineering. — Pearson, 2019. — 912 p.
35. Петров Ю. О. Контролери та датчики в автоматизованих системах. — Одеса : Моряк, 2021. — 312 с.
36. Petrović A. Model-Based Temperature Predictive Control in Boiler Systems // Thermal Engineering Review. — 2023. — № 3. — С. 29–38.
37. Плєскач О. А. Автоматизація системи керування прямоточним котлоагрегатом : магіст. робота. — Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2022. — 95 с.
38. Schneider Electric. Modicon M221/M241 : Boiler Control Documentation. — Schneider Electric, 2021. — Режим доступу: <https://www.se.com>
39. Сергієнко М. В., Лазаренко В. І. SCADA-система моніторингу температури теплообмінника // Автоматизація промислових процесів. — 2019. — № 11. — С. 34–41.
40. Siemens. SIMATIC S7 : Application Examples — Boiler Control. — Siemens AG, 2021. — Режим доступу: <https://support.industry.siemens.com>

41. Сидоренко М. Оптимізація температурного режиму котла на основі нечіткого керування : дипломна робота. — Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2021. — 68 с.
42. Слюсаренко А. Моделювання та регулювання температури теплообмінника : дипломна робота. — Харків : НТУ ХПІ, 2021. — 74 с.
43. Stoecker W. Industrial Process Control Systems. — New York : McGraw-Hill, 2019. — 402 p.
44. Sun L. Real-Time Boiler Dynamics and Control. — Springer, 2022. — 298 p.
45. SCADA-Based Monitoring of Steam Boiler Systems // Proc. Int. Conf. on Industrial Automation. — 2022. — С. 134–139.
46. Шевченко О. В. Моделі та алгоритми регулювання температури в котельних системах // Енергетика та автоматика. — 2022. — № 3. — С. 45–52.
47. Шевцова А. Контроль параметрів теплоносія в системах автоматизації // Теплоенергетика. — 2020. — № 2. — С. 60–64.
48. WAGO. Temperature Regulation with PLC750-Series : Application Guide. — WAGO, 2021. — Режим доступу: <https://www.wago.com>
49. Yadav A. Real-Time Boiler Automation Using PLC & SCADA // Journal of Thermal Engineering and Applications. — 2025. — № 2. — С. 12–19.
50. Zhang Y. Intelligent Control of Boiler Combustion Based on Fuzzy Logic // Energy Engineering Journal. — 2022. — № 4. — С. 28–34.