

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ

Група АКП-23-2К

Давид Саманів

2025

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

Саманів Давид Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681.51

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПІДГРІВАЧЕМ ВИСОКОГО ТИСКУ

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

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

(шифр і назва спеціальності)

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

Нормоконтроль

доцент

(посада)

О.В. Кучмистенко

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент

(посада)

Л.Я. Чигур

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-23-2К

(шифр групи)

Д.М. Саманів

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

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

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

« » 2025 року

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

Саманів Давид Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Синтез системи керування підігрівачем високого тиску

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

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «07» травня 2025 року № 58/2

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2025 р.

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

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

Вступ. 1. Комплексний аналіз технологічного процесу підігрівання
живильної води як об'єкту керування. 2. Еволюція та новітні тенденції в
технологіях керування підігрівачами високого тиску. 3. Розробка та валідація
математичної моделі підігрівача високого тиску як об'єкта керування. 4.
Синтез та аналіз системи автоматичного керування температурою живильної
води.

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

Лист 1 - Функціональна схема автоматизації - БР.АКП-24.00.00.000 01. Лист
2 - Порівняння технологій керування підігрівачем - БР.АКП-24.00.00.000 02.
Лист 3 - Дослідження динаміки керованого об'єкта – БР.АКП-24.00.00.000
03. Лист 4 - Синтез і моделювання одноконтурної АСК - БР.АКП-
24.00.00.000 04. Лист 5 - Синтез і моделювання каскадної АСК - БР.АКП-
24.00.00.000 05. Лист 6 - Аналіз характеристик ТЗА розробленої АСК -
БР.АКП-24.00.00.000 06.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 06.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Комплексний аналіз технологічного процесу підігрівання живильної води як об'єкту керування	13.05.2025	
2.	Еволюція та новітні тенденції в технологіях керування підігрівачами високого тиску	19.05.2025	
3	Розробка та валідація математичної моделі підігрівача високого тиску як об'єкта керування	26.05.2025	
4.	Синтез та аналіз системи автоматичного керування температурою живильної води	05.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Д.М. Саманів _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

І.І. Чигур _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 62 сторінок друкованого тексту, 15 рисунків, 8 таблиць, 8 посилань на джерела.

Тема: «Синтез системи керування підігрівачем високого тиску».

Об'єкт дослідження: підігрівач високого тиску.

Мета проекту: розробити систему керування основними параметрами підігрівача високого тиску.

Методи дослідження: методи системного аналізу, математичного моделювання та ідентифікації динамічних характеристик, синтезу та оцінки ефективності систем керування.

Результати бакалаврської роботи: Проведено аналіз робочих середовищ, визначено вимоги до систем моніторингу ключових параметрів (температура, тиск, витрата, рівень), що лягли в основу формування технічних вимог до засобів автоматизації. Виявлено недоліки традиційних одноконтурних схем керування, що пов'язані з інерційністю та складністю об'єкта. Обґрунтовано доцільність впровадження каскадної автоматизованої системи керування (АСК), яка забезпечує кращу якість регулювання. На основі експериментальних даних визначено передавальні функції по основному (температурному) та допоміжному (паровому) каналах. Проведена апроксимація моделей продемонструвала похибку менш ніж 2,5%, що дозволяє їх ефективно використовувати для розрахунку та оптимізації регуляторів. Розраховано налаштування регуляторів як для одноконтурної, так і для каскадної системи. Підтверджено стійкість обох систем, однак динамічні показники каскадної схеми суттєво переважають. Запропоновано реалізацію каскадної АСК на базі сучасних ПЛК, SCADA/HMI-систем, цифрових сенсорів і виконавчих механізмів. Надано рекомендації щодо вибору обладнання та методів налаштування системи керування.

Ключові слова: підігрівач, керування, каскадна, ПІД-регулятор, стійкість

ABSTRACT

Bachelor's thesis contains: 62 pages of printed text, 15 figures, 8 tables, 8 references to sources.

Topic: "Synthesis of a high-pressure heater control system".

Object of research: high-pressure heater.

Project goal: to develop a control system for the main parameters of a high-pressure heater.

Research methods: methods of system analysis, mathematical modeling and identification of dynamic characteristics, synthesis and assessment of the effectiveness of control systems.

Results of the bachelor's thesis: An analysis of working environments was carried out, requirements for monitoring systems of key parameters (temperature, pressure, flow rate, level) were determined, which formed the basis for the formation of technical requirements for automation equipment. The shortcomings of traditional single-loop control schemes associated with the inertia and complexity of the object were identified. The feasibility of implementing a cascade automated control system (ACS), which provides better quality regulation, was substantiated. Based on experimental data, transfer functions for the main (temperature) and auxiliary (steam) channels were determined. The model approximation demonstrated an error of less than 2.5%, which allows their effective use for calculating and optimizing regulators. Regulator settings were calculated for both single-loop and cascade systems. The stability of both systems was confirmed, however, the dynamic performance of the cascade scheme significantly prevailed. The implementation of cascade ASC based on modern PLCs, SCADA/HMI systems, digital sensors and actuators was proposed. Recommendations were given for the selection of equipment and methods for configuring the control system.

Keywords: heater, control, cascade, PID controller, stability

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПІДГРІВАННЯ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ ЯК ОБ’ЄКТУ КЕРУВАННЯ.....	10
1.1 Функціональне призначення, роль та вплив підігрівачів високого тиску на загальну ефективність енергоблоку.....	10
1.2 Детальна характеристика робочих середовищ: живильної води та гріючої пари.....	11
1.3 Конструктивні особливості, принцип дії та матеріальне виконання сучасних підігрівачів високого тиску.....	12
1.4 Технологічна схема системи регенерації високого тиску: опис, аналіз та шляхи оптимізації.....	14
1.5 Ключові технічні характеристики ПВТ та їх значення для проектування систем автоматизації.....	16
1.6 Сучасні підходи до контролю та вимірювання параметрів ПВТ.....	16
Висновки до розділу	22
2 ЕВОЛЮЦІЯ ТА НОВІТНІ ТЕНДЕНЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЯХ КЕРУВАННЯ ПІДГРІВАЧАМИ ВИСОКОГО ТИСКУ	22
2.1 Ретроспективний аналіз традиційних методів керування.....	23
2.2 Критичний аналіз недоліків існуючих одноконтурних систем регулювання температури живильної води та їх вплив на динаміку та економічність процесу.....	24
2.3 Каскадні системи автоматичного керування (АСК) як ефективний засіб підвищення якості регулювання.....	25
2.4. Огляд та перспективи застосування передових інтелектуальних технологій керування ПВТ.....	28
Висновки до розділу	30

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Синтез системи керування підігрівачем високого тиску	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Саманів Д.М.					6	62
Перевір.		Чигур І.І.						
Реценз.								
Н. Контр.		Кучмистенко О						
Затверд.		Лагойда А.І.				АКП-23-2К ІФНТУНГ		

3 РОЗРОБКА ТА ВАЛІДАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

ПІДГРІВАЧА ВИСОКОГО ТИСКУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ 32

3.1 Обґрунтування вибору конкретного підігрівача (ПВТ-7) як об'єкта для дослідження та автоматизації..... 32

3.2 Ідентифікація та аналіз основних збурюючих впливів, каналів регулювання та ключових вихідних координат об'єкта..... 33

3.3 Опис методології та умов проведення експериментального дослідження динамічних характеристик ПВТ 34

3.4 Аналіз та інтерпретація результатів експерименту, побудова та згладжування перехідних характеристик..... 36

3.5 Методика визначення передавальних функцій об'єкта по основному та допоміжному каналах регулювання, оцінка адекватності та точності отриманих моделей..... 38

Висновки до розділу 39

4 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ 40

4.1 Розрахунок, оптимізація та аналіз ефективності ПІД-регуляторів для одноконтурної АСР..... 40

4.2 Синтез каскадної АСР: обґрунтування вибору структури, розрахунок та сучасні методи налаштування параметрів основного та допоміжного ПІД-регуляторів..... 42

4.3 Комплексне дослідження стійкості розроблених одноконтурної та каскадної АСР 46

4.4 Порівняльна оцінка якості керування одноконтурної та каскадної АСР за основними показниками перехідних процесів..... 48

4.5 Рекомендації щодо технічної реалізації вдосконаленої системи керування ПВТ на сучасній елементній базі..... 51

Висновки до розділу 59

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... 60

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА..... 62

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Мета бакалаврської роботи: розробити систему керування основними параметрами підігрівача високого тиску.

Сучасний стан енергетичної галузі характеризується невпинним пошуком шляхів підвищення ефективності виробництва електричної та теплової енергії, що нерозривно пов'язано з модернізацією існуючого обладнання та впровадженням передових систем автоматизації. Підігрівачі високого тиску (ПВТ) є невід'ємними елементами теплових схем потужних енергоблоків теплових електростанцій (ТЕС), відіграючи ключову роль у регенеративному підігріві живильної води перед її подачею в котел. Ефективна робота ПВТ безпосередньо впливає на загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) енергоблоку, економію палива та, як наслідок, на екологічні показники роботи ТЕС. Оптимізація процесу підігріву живильної води дозволяє не тільки знизити питомі витрати палива, але й зменшити теплове навантаження на конденсатор турбіни, що сприяє більш раціональному використанню енергоресурсів.

Однак експлуатація ПВТ пов'язана з низкою технічних викликів. Необхідність підтримання оптимальних значень температури, тиску та рівня конденсату в умовах змінних навантажень енергоблоку, запобігання аварійним ситуаціям, пов'язаним з порушенням герметичності трубної системи або недопустимим підвищенням рівня, вимагають надійних та точних систем керування. Особливої актуальності ці питання набувають в контексті зростаючої частки відновлюваних джерел енергії в загальному енергобалансі. Нестабільний характер генерації сонячних та вітрових електростанцій змушує традиційні ТЕС працювати в більш маневрових режимах, з частими змінами навантаження. Це, в свою чергу, створює додаткові динамічні навантаження на все обладнання, включаючи ПВТ, та посилює вимоги до систем автоматизації. Системи керування ПВТ повинні бути не тільки точними, але й достатньо робастними та адаптивними, щоб забезпечувати стабільну та ефективну роботу в широкому діапазоні навантажень, мінімізуючи при цьому тепловтрати та знос обладнання.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, актуальність вдосконалення систем автоматизації ПВТ зумовлена не лише внутрішніми потребами ТЕС у підвищенні ефективності та надійності, але й зовнішніми факторами, пов'язаними зі структурними змінами в енергосистемі. Автоматизація виступає ключовим інструментом для вирішення цих проблем, забезпечуючи точне керування, безперервний моніторинг та можливість оптимізації технологічних процесів.

Метою даного дослідження є переробка та доповнення існуючих напрацювань у сфері автоматизації ПВТ енергоблоку 200 МВт для підвищення їх унікальності, актуальності та наукової цінності. Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

- Провести глибокий аналіз технологічного процесу підігріву живильної води в системі ПВТ, детально розглянувши конструктивні особливості обладнання, параметри робочих середовищ та існуючі методики розрахунку теплового балансу, доповнивши його оглядом сучасних засобів моніторингу ключових параметрів.
- Дослідити еволюцію технологій керування ПВТ, починаючи від традиційних підходів і закінчуючи новітніми інтелектуальними системами, такими як модельно-прогнозуюче керування, системи на основі штучного інтелекту, нечіткої логіки та концепції цифрових двійників.
- Зберегти та валідувати математичну модель ПВТ-7, отриману на основі експериментальних даних, як об'єкта автоматизації.
- Виконати синтез та порівняльний аналіз якості регулювання для одноконтурної та каскадної систем автоматичного керування температурою живильної води, доповнивши аналіз сучасними методами налаштування регуляторів та рекомендаціями щодо технічної реалізації на сучасній елементній базі.
- Надати обґрунтовані рекомендації щодо поетапного впровадження вдосконалених систем автоматизації ПВТ на теплових електростанціях для підвищення їх ефективності, надійності та безпеки експлуатації.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПІДГРІВАННЯ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

1.1 Функціональне призначення, роль та вплив підігрівачів високого тиску на загальну ефективність енергоблоку

Підігрівачі високого тиску (ПВТ) є критично важливими компонентами теплоенергетичних установок, функціональне призначення яких полягає у забезпеченні нагрівання робочих середовищ, переважно живильної води, до високих температур за умов високого тиску. Це необхідно для подальшого використання нагрітої води в енергетичних та, в деяких випадках, хімічних технологічних процесах. В контексті теплових електростанцій, ПВТ відіграють центральну роль у системі регенеративного підігріву живильної води. Цей процес передбачає використання тепла пари, відібраної з проміжної частини турбіни, для підвищення температури живильної води перед її надходженням до парового котла.

Основна роль ПВТ полягає у підвищенні загального термічного коефіцієнта корисної дії (ККД) паротурбінного циклу. Завдяки регенеративному підігріву зменшується кількість тепла, що підводиться до робочого тіла в котлі від спалювання палива, а також знижується кількість тепла, що скидається в навколишнє середовище з відпрацьованою парою в конденсаторі турбіни. Це призводить до суттєвої економії палива та, як наслідок, до зниження собівартості виробленої електроенергії. Дослідження та практика експлуатації показують, що ефективно функціонуючі системи ПВТ можуть забезпечити зниження споживання палива на 10-20%. Наприклад, для котла потужністю 100 МВт, покращення ефективності системи підігріву живильної води на 10% може призвести до щорічної економії палива, еквівалентної \$1.5 мільйонам доларів. Окрім прямого економічного ефекту, підвищення ефективності роботи ПВТ сприяє зменшенню викидів шкідливих речовин в атмосферу, що є важливим аспектом в умовах сучасних екологічних вимог.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1.2 Детальна характеристика робочих середовищ: живильної води та гріючої пари

У системі ПВТ енергоблоку 200 МВт, що розглядається, живильна вода подається з деаераційної установки з температурою 165 °С та під тиском 20 МПа. Пройшовши через каскад підігрівачів, її температура на виході з системи ПВТ досягає 240 °С. Гріючою парою слугує пара, відібрана з різних ступенів турбіни. Параметри цієї пари для кожного з підігрівачів наведені в таблиці 1.1.

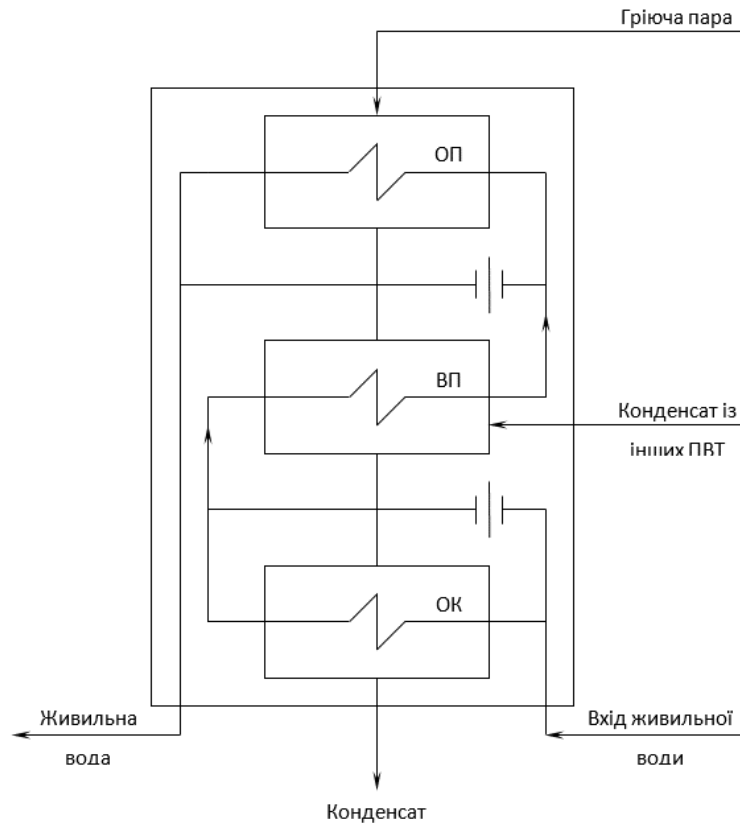
Таблиця 1.1 - Параметри регенеративних відборів турбіни на підігрівачі високого тиску

НОМЕР ВІДБОРУ	МІСЦЕ ВІДБОРУ	ПІДІГРІВАЧ	ТИСК, МПА	ТЕМПЕРАТУРА, °С
1	ЦВТ	9 ступінь	ПВТ-7	369
2	ЦВТ	12 ступінь	ПВТ-6	356
3	ЦСТ	15 ступінь	ПВТ-5	478

Окрім термодинамічних параметрів, надзвичайно важливими є вимоги до якості живильної води. Наявність у воді розчинених солей, кисню та інших домішок може призвести до інтенсивної корозії внутрішніх поверхонь трубок ПВТ та утворення накипу. Накип, маючи низьку теплопровідність, суттєво погіршує ефективність теплообміну між гріючою парою та живильною водою, що призводить до перегріву металу трубок та їх можливого руйнування. Корозійні процеси також скорочують термін служби обладнання та можуть стати причиною аварійних зупинок. Як зазначається в , "неадекватна водопідготовка може призвести до значних проблем, таких як утворення накипу та корозія, що серйозно знижують ефективність та термін служби підігрівача живильної води". Тому системи водопідготовки на ТЕС повинні забезпечувати глибоке знесолення та деаерацію живильної води, а якість води та пари має постійно контролюватися.

1.3 Конструктивні особливості, принцип дії та матеріальне виконання сучасних підігрівачів високого тиску

Підігрівачі високого тиску, що розглядаються в даній роботі, є поверхневими апаратами колекторного типу. Їх конструкція передбачає розміщення колекторів для розподілу та збору живильної води безпосередньо всередині корпусу, без використання традиційних трубних дощок (рисунок 1.1).

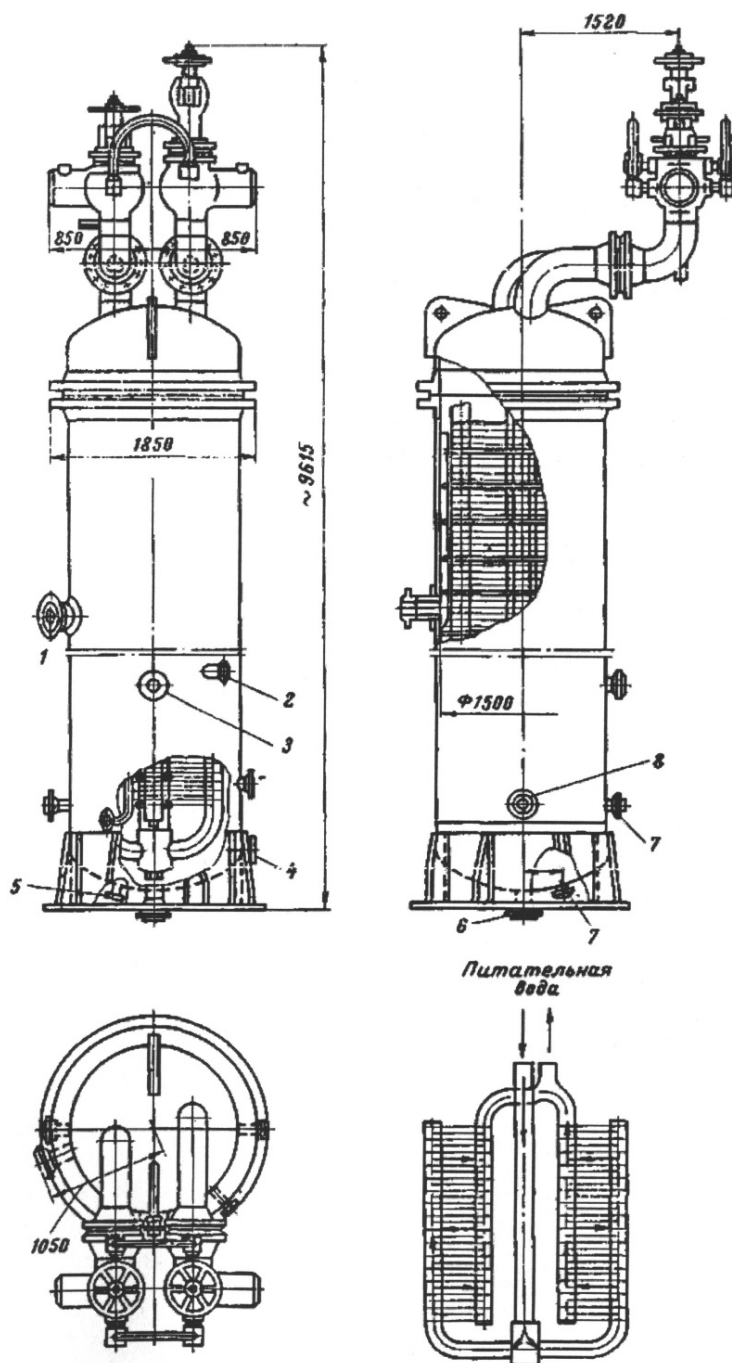


ОП – охолоджувач пари; ВП – власне підігрівач; ОК – охолоджувач конденсату

Рисунок 1.1 - Рух теплообмінних середовищ ПВД

Теплообмінна поверхня формується зі спіральних горизонтальних пакетів сталевих трубок. Для підвищення ефективності використання температурного потенціалу перегрітої пари, яка надходить у ПВД, частина верхніх пакетів змійовиків виділяється в окремий відсік – пароохолоджувач. У цьому відсіку перегріта пара охолоджується до температури, близької до температури насичення, передаючи тепло живильній воді. Після цього пара надходить в основну частину підігрівача, де відбувається її конденсація. У нижній частині

ПВТ розташований охолоджувач конденсату, конструктивно схожий на пароохолоджувач, призначений для додаткового використання тепла конденсату гріючої пари (рисунок 1.2).



1 – вхід пари; 2 – вхід повітря з попереднього підігрівача; 3 – вивід повітря; 4 – до водяного вказівника рівня; 5 – спуск конденсату; 6 – вивід конденсату гріючої пари; 7 – до поплавкової камери відводу конденсату; 8 – злив конденсату з підігрівача

Рисунок 1.2 - Схема підігрівача високого тиску

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ

Арк.

13

Всі ПВТ даного типу виконуються вертикальними. Основними вузлами є корпус та трубна система. Елементи корпусу виготовляються з якісної вуглецевої сталі марки 20К, що забезпечує їх надійну роботу при високих тисках та температурах. Хоча в даній роботі детально розглядаються саме закриті поверхневі ПВТ, варто зазначити, що існують і інші типи, такі як відкриті (змішувальні) підігрівачі, де відбувається безпосередній контакт гріючої пари та живильної води, а також прямоконтактні та випарні ПВТ. Відкриті ПВТ, як правило, мають вищу термодинамічну ефективність, оскільки температура живильної води на виході дорівнює температурі насичення при тиску в підігрівачі, проте вони вимагають більш складних систем керування рівнем та можуть призводити до потрапляння неконденсованих газів у живильний тракт.

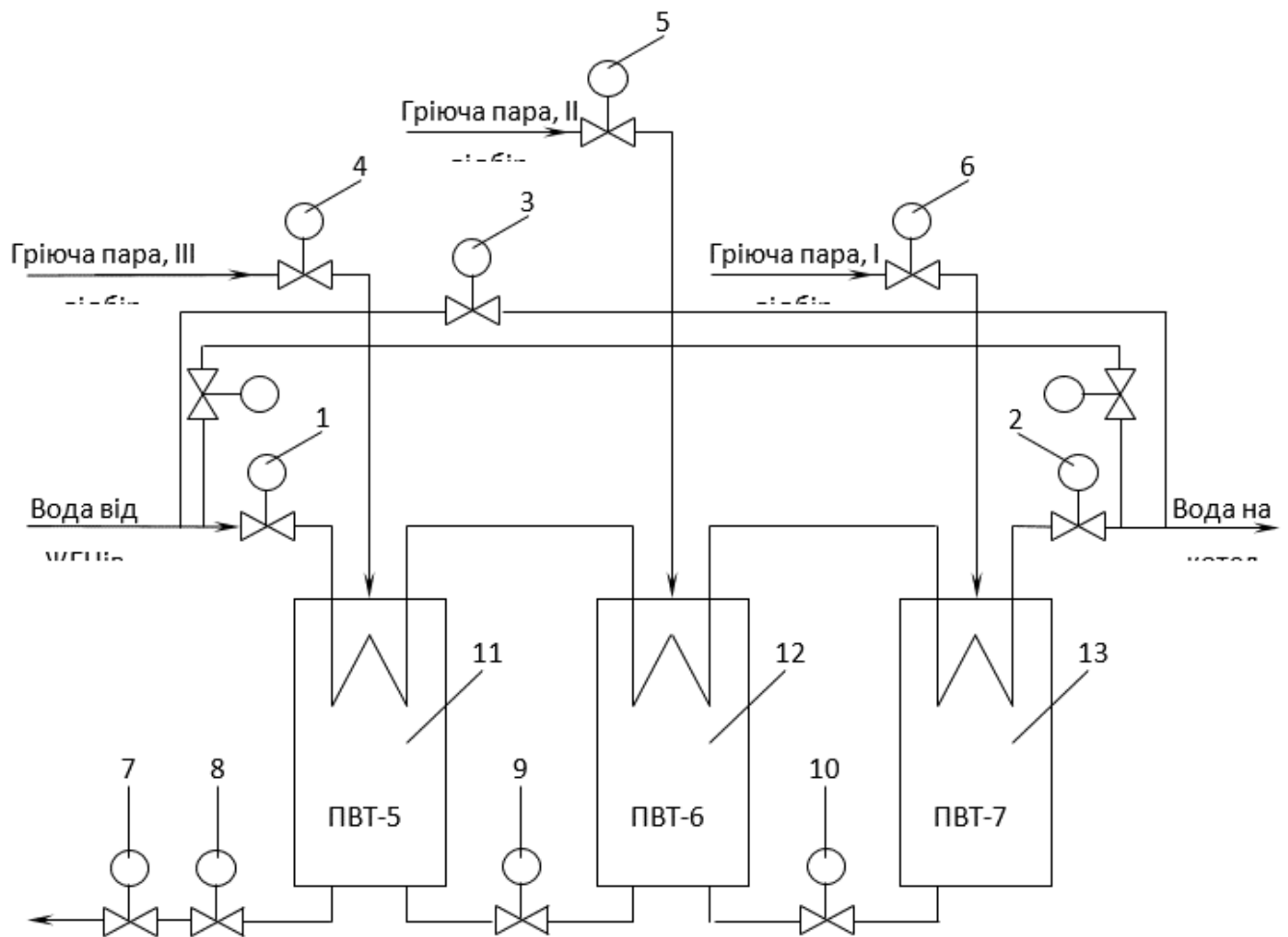
1.4 Технологічна схема системи регенерації високого тиску: опис, аналіз та шляхи оптимізації

Технологічна схема системи регенерації високого тиску енергоблоку 200 МВт передбачає послідовне проходження живильної води через три підігрівачі: ПВТ-5, ПВТ-6 та ПВТ-7. Живильна вода від живильних електронасосів надходить спочатку в ПВТ-5, потім в ПВТ-6 і, нарешті, в ПВТ-7, після чого спрямовується в котел. Гріюча пара для кожного ПВТ відбирається з відповідних відборів турбіни (III, II та I відбори для ПВТ-5, ПВТ-6 та ПВТ-7 відповідно). Схема передбачає можливість роботи в обхід групи ПВТ, що використовується під час пускових операцій або в деяких аварійних режимах.

Конденсат гріючої пари збирається в нижній частині кожного підігрівача і зливається каскадно: з ПВТ-7 в ПВТ-6, з ПВТ-6 в ПВТ-5, а з ПВТ-5 – в деаератор або на підігрівач низького тиску ПНТ-4. Такий каскадний злив дозволяє максимально утилізувати тепло конденсату. Важливим елементом технологічної схеми є системи захисту ПВТ по рівню конденсату. При недопустимому підвищенні рівня спрацьовує захист, що відключає групу ПВТ і направляє живильну воду в обхід. При подальшому зростанні рівня до аварійної межі відбувається зупинка всього енергоблоку. Робота ПВТ без введених у дію

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

захистів категорично заборонена (рисунок 1.3).



1-7 – електрифіковані засувки; 8-10 – регулюючі клапани; 11-13 –
підігрівачі високого тиску

Рисунок 1.3 - Технологічна схема системи регенерації високого тиску
енергоблоку 200 МВт

Аналіз даної схеми показує, що її ефективність значною мірою залежить від точності підтримання параметрів у кожному з підігрівачів, зокрема рівня конденсату та температури живильної води. Шляхи оптимізації роботи системи регенерації лежать, перш за все, у вдосконаленні систем автоматичного керування цими параметрами, що буде детально розглянуто в наступних розділах. Це включає модернізацію засобів вимірювання, виконавчих механізмів та алгоритмів керування.

1.5 Ключові технічні характеристики ПВТ та їх значення для проектування систем автоматизації

Три підігрівачі високого тиску, встановлені на енергоблоці 200 МВт, є однотипними апаратами типу ПВ-500-230. Їх основні технічні характеристики наступні :

- Поверхня нагрівання: 500м²
- Витрата води: 575т/год
- Тиск пари (номінальний): 3800кПа
- Максимальна температура води на виході: 270°С
- Маса підігрівача (без арматури та трубопроводів): 23,8т

Ці характеристики мають безпосереднє значення для проектування систем автоматизації. Велика поверхня нагрівання та значна маса підігрівача свідчать про його суттєву теплову інерційність. Це означає, що зміна керуючого впливу (наприклад, витрати гріючої пари) призводитиме до зміни температури живильної води не миттєво, а з певним запізненням та поступово. Цю інерційність необхідно враховувати при синтезі регуляторів для забезпечення стійкості та необхідної якості перехідних процесів. Високі значення робочих тисків та температур висувають жорсткі вимоги до надійності та точності датчиків, регулюючих клапанів та іншої арматури, а також до матеріалів, з яких вони виготовлені. Номінальна витрата води та пари визначають необхідну пропускну здатність регулюючих органів та діапазони вимірювання датчиків витрати.

1.6 Сучасні підходи до контролю та вимірювання параметрів ПВТ

Ефективне та безпечне керування підігрівачами високого тиску неможливе без точної та надійної інформації про поточний стан технологічного процесу. Це забезпечується сучасними системами контролю та вимірювання ключових параметрів, таких як температура, тиск, рівень та витрата робочих середовищ. Впровадження сучасних, високоточних та "інтелектуальних" датчиків є не просто заміною застарілого обладнання, а фундаментальною передумовою для переходу до більш складних та ефективних стратегій керування, таких як модельно-

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

прогнозує керування (MPC), системи на основі штучного інтелекту та концепція цифрових двійників. Без якісних вхідних даних ефективність цих передових систем буде суттєво обмежена, адже неточні або зашумлені вимірювання призводять до помилкових рішень системи керування. Таким чином, модернізація вимірювальної бази є першочерговим кроком і необхідною умовою для успішного впровадження сучасних технологій автоматизації ПВТ.

1.6.1 Огляд та характеристики інноваційних датчиків температури, тиску, рівня та витрати

У системах автоматизації ПВТ, описаних в , згадуються "два автоматичних комплекти рівнемірів" та "давач температури", що є досить загальними формулюваннями. Сучасний ринок пропонує широкий спектр інноваційних вимірювальних приладів, що дозволяють значно підвищити точність, надійність та інформативність систем контролю.

- Датчики температури: Для вимірювання температури живильної води та пари в ПВТ широко використовуються платинові терморезистори (наприклад, Pt100, Pt1000) та термопари (наприклад, типу K, J, S). Сучасні датчики температури часто оснащуються вбудованими перетворювачами з уніфікованим вихідним сигналом (4-20 мА) та підтримкою цифрових протоколів (HART, Foundation Fieldbus, Profibus PA). Це забезпечує високу точність передачі даних, можливість дистанційного налаштування та діагностики датчика, а також знижує загальну вартість володіння. Компанія ABB, наприклад, пропонує датчики температури, розраховані на експлуатацію при температурах до 1800°C.

- Датчики тиску: Для вимірювання високих тисків живильної води (до 20 МПа і вище) та пари використовуються сучасні датчики тиску, що базуються на різних фізичних принципах (наприклад, ємнісні, п'єзорезистивні, тензорезистивні). Вони характеризуються високою точністю (класи точності 0.05 – 0.1 % і вище), стабільністю показів у часі, стійкістю до вібрацій та температурних впливів. Для критично важливих застосувань доступні датчики з SIL-сертифікацією (Safety Integrity Level). Тиск у котельних установках може

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

досягати 600бар (60МПа), що вимагає відповідної надійності вимірювальних приладів.

- Датчики рівня: Контроль рівня конденсату в ПВТ є надзвичайно важливим для запобігання затопленню трубної системи або перетіканню пари. Замість традиційних поплавкових або диференціально-манометричних рівнемірів, сьогодні все частіше застосовуються більш досконалі технології:

- Радарні рівнеміри (безконтактні): Вимірюють рівень за часом проходження мікрохвильового імпульсу до поверхні рідини та назад. Вони нечутливі до змін щільності, температури та тиску середовища, а також до наявності пари.

- Керовані хвильові радарні рівнеміри (Guided Wave Radar - GWR): Мікрохвильовий імпульс поширюється вздовж зонда, зануреного в рідину. Забезпечують надійне вимірювання навіть в умовах турбулентності, піноутворення та при низьких діелектричних проникностях середовища. ABB пропонує систему вимірювання рівня Magwave з подвійною камерою, де одна камера використовує магнітний показник, а інша – керований хвильовий радар для безперервного вимірювання, що забезпечує високу надійність та точність.

- Магнітострикційні рівнеміри: Забезпечують високу точність та роздільну здатність, використовуючи поплавок з магнітом, положення якого визначається за допомогою магнітострикційного ефекту у хвилеводі.

- Ультразвукові рівнеміри (безконтактні): Використовують ультразвукові хвилі, але їх застосування може бути обмежене в умовах високої температури та наявності щільної пари над поверхнею рідини.

- Датчики витрати: Точне вимірювання витрати живильної води та гріючої пари необхідне для розрахунку теплового балансу, контролю ефективності та оптимального керування. Сучасні витратоміри включають:

- Коріолісові витратоміри: Забезпечують пряме вимірювання масової витрати з високою точністю, незалежно від щільності, в'язкості та температури середовища. Є одними з найточніших, але й найдорожчих.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

- Електромагнітні витратоміри: Призначені для вимірювання об'ємної витрати електропровідних рідин (наприклад, живильної води). Характеризуються відсутністю рухомих частин та низькими втратами тиску.
- Вихрові (Vortex) витратоміри: Вимірюють об'ємну витрату рідин, газів та пари. Принцип дії заснований на вимірюванні частоти утворення вихорів за тілом обтікання. Сучасні вихрові лічильники можуть мати вбудовану компенсацію за температурою та тиском для розрахунку масової витрати. Наприклад, вихрові витратоміри Swirl від ABB мають точність $\pm 0.5\%$ та вбудовані датчики температури. Armstrong International також пропонує вихрові лічильники з інтегральною компенсацією тиску та температури.
- Ультразвукові витратоміри (накладні або врізні): Вимірюють швидкість потоку за часом проходження ультразвукових сигналів. Накладні моделі дозволяють проводити вимірювання без врізки в трубопровід, що зручно для тимчасових вимірювань або на існуючих об'єктах.
- Витратоміри на основі перепаду тиску (з діафрагмами, соплами, трубками Вентурі): Класичний метод, але сучасні перетворювачі диференціального тиску та обчислювачі витрати дозволяють досягти прийнятної точності. Armstrong пропонує запатентований витратомір VERIS Accelabar®, який не вимагає прямих ділянок труби для встановлення та має широкий діапазон вимірювань.

Таблиця 1.5 - Порівняльна характеристика сучасних датчиків для моніторингу параметрів ПВТ

ТИП ДАТЧИКА	ПРИНЦИП ДІЇ	ПРИКЛАДИ ВИРОБНИКІВ/МОДЕЛЕЙ (ДЖЕРЕЛА)	ДІАПАЗОН ВИМІРЮВАНЬ (ТИПОВИЙ ДЛЯ ПВТ)	ТОЧНІСТЬ (ТИПОВА)	ПЕРЕВАГИ
Температура					
Терморезистор (Pt100/Pt1000)	Зміна електричного опору платини з температурою	ABB, Siemens, Endress+Hauser	до 600°C (спец. до 850°C)	Клас А, АА (ІЕС 60751)	Висока стабільність, лінійність

ТЕРМОПАРА	ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ (РІЗНИЦЯ ПОТЕНЦІАЛІВ НА СПАЇ РІЗНИХ МЕТАЛІВ)	ABB, OMEGA, WIKA	ТИП К: ДО 1200°C, ТИП S: ДО 1600°C	КЛАС 1, 2 (ІЕС 60584)	ШИРОКИЙ ДІАПАЗОН, ШВИДКА РЕАКЦІЯ
Тиск					
Ємнісний/Тензорезистивний	Зміна ємності або опору сенсора під дією тиску	ABB (266 серія), Emerson (Rosemount 3051), Yokogawa (EJA серія)	до 40МПа і вище	0.025%–0.075 % від діапазону	Висока точність, стабільність, стійкість до перевантажень
Рівень					
Керований хвильовий радар (GWR)	Поширення мікрохвиль вздовж зонда	Emerson (Rosemount 5300), Endress+Hauser (Levelflex), ABB (MT5000)	Довжина зонда до десятків метрів	±2...5мм	Надійність в складних умовах (пара, піна, турбулентність), нечутливість до змін середовища
Радарний (безконтактний)	Випромінювання мікрохвиль на поверхню та прийом відбитого сигналу	Vega (VEGAPULS), Krohne (Optiwave)	до 30–40м	±1...2мм	Безконтактний, нечутливий до властивостей середовища
Витрата					
Коріолісовий	Вимірювання сили Коріоліса, що діє на вібруючі трубки	Emerson (Micro Motion), Endress+Hauser (Promass), Yokogawa (Rotamass)	Залежить від діаметра, для води та пари	±0.05%–0.1% (масова)	Пряме вимірювання масової витрати, висока точність, не залежить від властивостей середовища
Вихровий (Vortex)	Вимірювання частоти утворення вихорів	Emerson (Rosemount 8800D), Yokogawa (digitalYEWFL), ABB (FSV430/450), Armstrong	Для пари та води, залежить від діаметра	±0.5%–1.0% (об'ємна)	Універсальність (рідини, газу, пара), відносно невисока вартість

1.6.2 Вимоги до точності, надійності та швидкодії вимірювальних систем в умовах експлуатації ПВТ

Ефективна робота систем автоматизації ПВТ безпосередньо залежить від якості інформації, що надходить від вимірювальних систем. Тому до них висуваються жорсткі вимоги:

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- **Точність:** Висока точність вимірювань є критичною для забезпечення оптимальних режимів роботи ПВТ, мінімізації відхилень параметрів від заданих значень та ефективного використання енергоресурсів. Наприклад, навіть невелике відхилення у вимірюванні температури живильної води може призвести до значних змін у ККД енергоблоку.
- **Надійність:** Датчики та вимірювальні системи повинні стабільно працювати в складних умовах експлуатації ПВТ, які характеризуються високими температурами (до 400–500°C і вище для пари) та тисками (десятки МПа), наявністю вібрацій, електромагнітних завад. Вихід з ладу ключових датчиків може призвести до некоректної роботи системи керування або навіть до аварійних ситуацій. Важливим аспектом надійності є використання датчиків з функціями самодіагностики, що дозволяють своєчасно виявляти несправності.
- **Швидкодія:** Вимірювальні системи повинні мати достатню швидкодію для своєчасного відстеження динамічних змін параметрів процесу, особливо в перехідних режимах роботи енергоблоку або при виникненні збурень. Затримки у вимірюваннях можуть негативно вплинути на якість регулювання.
- **Сертифікація:** Для обладнання, що працює в потенційно небезпечних умовах або впливає на безпеку експлуатації, важлива наявність відповідних сертифікатів (наприклад, SIL для систем безпеки, АTEX для вибухонебезпечних зон, якщо такі є поблизу).

Недостатня увага до якості живильної води та стану теплообмінних поверхонь може звести нанівець переваги навіть найсучаснішої системи автоматичного керування. Фізичні обмеження об'єкта, такі як забруднення трубок накипом або їх корозія, не дозволяють досягти розрахункової ефективності теплообміну, навіть якщо система керування ідеально підтримує задані параметри гріючої пари. Якщо теплообмінні поверхні забруднені, для нагрівання живильної води до необхідної температури буде потрібно значно більше гріючої пари, що призведе до зниження загальної ефективності енергоблоку. Тому ефективна автоматизація повинна розглядатися в комплексі з належною експлуатацією, регулярним технічним обслуговуванням ПВТ та суворим контролем якості

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

водопідготовки. Сучасні системи діагностики, можливо, інтегровані в концепцію цифрових двійників або реалізовані за допомогою методів штучного інтелекту, могли б відстежувати погіршення коефіцієнта теплопередачі як індикатор необхідності проведення очищення теплообмінних поверхонь.

Висновки до розділу

У даному розділі проведено комплексний аналіз технологічного процесу підігрівання живильної води в підігрівачах високого тиску енергоблоку 200 МВт. Детально розглянуто функціональне призначення ПВТ, їх роль у підвищенні ефективності паротурбінного циклу та вплив на економічність роботи енергоблоку. Наведено характеристики робочих середовищ – живильної води та гріючої пари, підкреслено важливість якості водопідготовки для запобігання корозії та накипоутворенню. Описано конструктивні особливості та принцип дії ПВТ поверхневого типу, а також технологічну схему системи регенерації високого тиску.

Проаналізовано ключові технічні характеристики ПВТ та їх значення для проектування систем автоматизації. Особливу увагу приділено сучасним підходам до контролю та вимірювання параметрів ПВТ, включаючи огляд інноваційних датчиків температури, тиску, рівня та витрати, та вимог до їх точності, надійності та швидкодії. Встановлено, що модернізація вимірювальної бази є фундаментальною передумовою для впровадження передових стратегій керування.

Розглянуто методику розрахунку теплового балансу підігрівачів та наведено результати розрахунку витрат гріючої пари для номінального режиму роботи енергоблоку. Підкреслено значення теплового балансу для оцінки ефективності роботи ПВТ та діагностики можливих несправностей. Зроблено висновок, що задача удосконалення системи автоматизації ПВТ полягає у модернізації приладів і засобів автоматики та вимірювання з метою підвищення надійності та точності підтримання технологічних параметрів, що відкриває шлях до застосування цифрових та мікропроцесорних технологій керування.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ЕВОЛЮЦІЯ ТА НОВІТНІ ТЕНДЕНЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЯХ КЕРУВАННЯ ПІДІГРІВАЧАМИ ВИСОКОГО ТИСКУ

2.1 Ретроспективний аналіз традиційних методів керування

На ранніх етапах розвитку теплоенергетики керування підігрівачами високого тиску значною мірою покладалося на ручне втручання оперативного персоналу. Оператори візуально контролювали покази приладів (манометрів, термометрів, рівнемірів) та вручну регулювали положення запірно-регулюючої арматури для підтримання параметрів у допустимих межах. Основними недоліками такого підходу були низька точність регулювання, повільна реакція на збурення, значний вплив людського фактору (втом, помилки оператора) та, як наслідок, неоптимальне використання енергоресурсів і підвищений ризик аварійних ситуацій.

Подальший розвиток призвів до впровадження класичних систем автоматизації, основу яких склали пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори. Ці регулятори дозволили автоматично стабілізувати ключові параметри, такі як температура живильної води на виході з ПВТ або рівень конденсату в підігрівачі, шляхом впливу на відповідні регулюючі органи (наприклад, клапани подачі гріючої пари або зливу конденсату). ПІД-регулятори забезпечили значне покращення якості керування порівняно з ручним втручанням, зменшили коливання параметрів та підвищили стабільність роботи обладнання. Однак ефективність ПІД-регуляторів суттєво залежить від точності їх налаштування, яке може бути складним для об'єктів з великою інерційністю та нелінійними характеристиками, якими є ПВТ. Крім того, класичні ПІД-регулятори з фіксованими налаштуваннями мають обмежену адаптивність до змінних умов експлуатації (наприклад, зміна навантаження енергоблоку, коливання параметрів гріючої пари).

З появою мікропроцесорної техніки та розвитком автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) стало можливим створення більш комплексних та централізованих систем керування ПВТ. АСУ ТП, що

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

базуються на програмованих логічних контролерах (ПЛК) та системах людино-машинного інтерфейсу (HMI/SCADA), дозволили не тільки реалізувати алгоритми ПД-регулювання, але й забезпечити збір, обробку, відображення та архівування великих обсягів технологічної інформації, реалізацію складних логічних блокувань та захистів, а також дистанційне керування обладнанням. Типова АСУ ТП включає розподілені контролери (DCS або PLC), системи збору даних та диспетчерського керування (SCADA), що забезпечують моніторинг та керування всіма параметрами в реальному часі. SCADA-системи збирають дані з польових пристроїв (датчиків, ПЛК) та надають оператору графічний інтерфейс для контролю та управління процесом.

2.2 Критичний аналіз недоліків існуючих одноконтурних систем регулювання температури живильної води та їх вплив на динаміку та економічність процесу

Незважаючи на переваги автоматизації, існуючі системи керування ПВТ, особливо ті, що базуються на простих одноконтурних схемах регулювання, мають суттєві недоліки. У роботі зазначається, що для автоматичного підтримання температури живильної води на виході з підігрівачів часто використовується одноконтурна система регулювання. У такій системі сигнал від датчика температури, встановленого на виході живильної води з підігрівача, надходить на регулятор, який здійснює керуючий вплив шляхом зміни кількості гріючої пари, що подається в підігрівач.

Ключовим недоліком такої одноконтурної системи є її значна інерційність по каналу "витрата гріючої пари – температура живильної води на виході". Ця інерційність обумовлена, по-перше, самою природою теплообмінних процесів у ПВТ, які характеризуються повільним розповсюдженням тепла та значною тепловою ємністю металу і води. По-друге, додаткову затримку вносить інерційність самого датчика температури, який реагує на зміну температури середовища не миттєво, а через процес теплопередачі до його чутливого елемента.

Велика інерційність об'єкта керування негативно впливає на якість регулювання.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Система повільно реагує на збурення (наприклад, зміну витрати живильної води або параметрів гріючої пари), що призводить до тривалих відхилень температури від заданого значення. Можливі також значні перерегулювання та коливальні перехідні процеси, особливо при неоптимальному налаштуванні регулятора. Такі відхилення температури живильної води від оптимального значення безпосередньо впливають на економічність роботи енергоблоку. Недогрів живильної води призводить до збільшення витрат палива в котлі для досягнення необхідної температури перегрітої пари, тоді як її перегрів може свідчити про нераціональне використання пари з відборів турбіни та потенційні проблеми з обладнанням.

2.3 Каскадні системи автоматичного керування (АСК) як ефективний засіб підвищення якості регулювання

Для подолання недоліків одноконтурних систем регулювання для об'єктів з великою інерційністю, якими є ПВТ, доцільним є застосування каскадних систем автоматичного керування (АСК).

2.3.1 Детальний опис принципу дії та структурної схеми каскадної АСК для ПВТ

Принцип дії каскадної АСК полягає у використанні двох (або більше) контурів регулювання, де вихідний сигнал зовнішнього (основного) регулятора слугує завданням для внутрішнього (допоміжного, стабілізуючого) регулятора. Внутрішній контур охоплює частину об'єкта, яка має меншу інерційність та швидше реагує на керуючий вплив.

У випадку керування температурою живильної води в ПВТ (наприклад, ПВТ-7, структурна схема каскадної АСК виглядає наступним чином:

- Зовнішній (основний) контур: Регулює основний технологічний параметр – температуру живильної води на виході з ПВТ ($T_{жв}$). Датчик температури вимірює поточне значення $T_{жв}$ і передає сигнал на основний

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

регулятор (регулятор 1 на рисунок 2.1). Цей регулятор порівнює фактичну температуру із заданим значенням (уставкою) і формує керуючий сигнал.

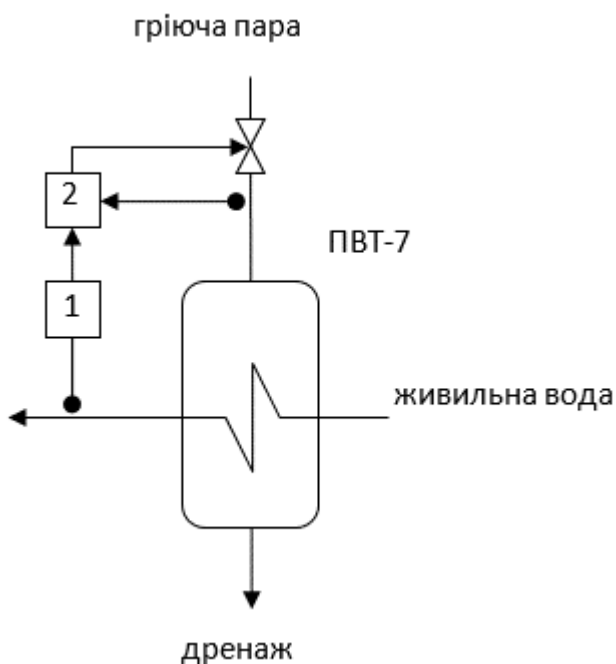


Рисунок 2.1 - Схема каскадної системи регулювання температури живильної води на виході ПВТ з корекцією по витраті гріючої пари

- Внутрішній (допоміжний) контур: Цей сигнал від основного регулятора слугує завданням для допоміжного регулятора (регулятор 2 на рисунок 2.1). Допоміжний регулятор керує проміжним параметром, який швидко реагує на зміну положення регулюючого органу та суттєво впливає на основний параметр. У даному випадку таким проміжним параметром є витрата гріючої пари ($G_{гп}$), що подається в ПВТ. Датчик витрати гріючої пари вимірює її поточне значення і передає сигнал на допоміжний регулятор. Цей регулятор порівнює фактичну витрату пари із завданням, отриманим від основного регулятора, і впливає на виконавчий механізм (регулюючий клапан на лінії подачі гріючої пари) для стабілізації витрати пари.

Таким чином, внутрішній, швидкодіючий контур по витраті гріючої пари оперативно компенсує збурення, пов'язані з подачею пари (наприклад, коливання тиску пари в магістралі перед клапаном, зміна характеристики клапана), ще до того, як ці збурення встигнуть суттєво вплинути на температуру живильної води,

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

що є більш інерційним параметром.

2.3.2 Обґрунтування переваг каскадних систем у контексті компенсації збурень та покращення перехідних процесів

Застосування каскадних АСК для керування ПВТ надає низку суттєвих переваг порівняно з одноконтурними системами :

1. Значне покращення якості керування при обробці збурень: Особливо це стосується збурень, що діють на об'єкт всередині внутрішнього контуру. Внутрішній регулятор швидко їх компенсує, не дозволяючи їм значно вплинути на основний регульований параметр.

2. Підтримання керованого параметра на заданому значенні з високою точністю при великому запізненні об'єкта керування: Зовнішній контур "бачить" об'єкт з меншою ефективною інерційністю завдяки стабілізуючій дії внутрішнього контуру.

3. Швидка компенсація збурень, які діють на стабілізуючий (внутрішній) контур регулювання: Це запобігає відхиленню основного керованого параметра від заданого значення.

4. Значне покращення якості регулювання при збуреннях, які прикладені до елементів об'єкта керування, що не охоплені стабілізуючим контуром: Це досягається за рахунок більш високої власної частоти каскадної АСК.

5. Компенсація зміни коефіцієнта передачі внутрішньої частини об'єкта керування: Здійснюється шляхом зміни коефіцієнта передачі стабілізуючого контуру регулювання.

6. Зменшення мертвого часу та фазового зсуву: Як зазначається каскадне керування допомагає зменшити мертвий час та фазовий зсув у системі керування, що покращує динамічну відповідь.

Каскадна структура дозволяє ефективно "розділити" завдання регулювання: внутрішній контур швидко реагує на локальні збурення, пов'язані з регулюючим впливом, тоді як зовнішній контур забезпечує точне підтримання основної технологічної величини. Це підвищує загальну робастність системи до збурень та

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметричних змін об'єкта. Однак, слід зазначити, що впровадження каскадної системи призводить до ускладнення структури АСК, підвищення її вартості та потенційного зниження надійності через збільшення кількості елементів.

2.4 Огляд та перспективи застосування передових інтелектуальних технологій керування ПВТ

Поряд з класичними підходами, такими як ПД-регулювання та каскадні системи, сучасна теорія та практика автоматичного керування пропонують низку передових інтелектуальних технологій, які мають значний потенціал для подальшого вдосконалення систем керування ПВТ (таблиці 2.1). Перехід до цих технологій є не просто еволюційним кроком, а якісним стрибком, що передбачає зміну парадигми від переважно реактивного керування до проактивного, предиктивного та самооптимізуючого. Це означає, що система не просто "тримає" заданий параметр, а "передбачає" можливі проблеми, "навчається" на основі накопиченого досвіду та "оптимізує" свою роботу для досягнення вищих цілей, таких як максимальна ефективність, надійність та економічність. Однак такий перехід вимагає не лише нових алгоритмів, але й більш досконалих датчиків (як обговорювалося в Розділі 1), потужних обчислювальних платформ, розвиненої інфраструктури збору та обробки даних, а також висококваліфікованого персоналу.

Інтеграція різних інтелектуальних технологій може призвести до синергетичного ефекту, створюючи гібридні системи керування, які поєднують переваги кожного підходу. Наприклад, цифровий двійник може слугувати платформою для тестування та валідації алгоритмів MPC або ШІ перед їх впровадженням на реальному об'єкті. Нейронна мережа може використовуватися для ідентифікації моделі процесу для MPC або для налаштування правил нечіткого логічного контролера. Нечітка логіка може доповнювати MPC для обробки ситуацій, не передбачених моделлю, або для інтерпретації результатів роботи ШІ. Таким чином, майбутнє, ймовірно, за комбінованими, багаторівневими системами керування, де різні інтелектуальні інструменти

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

працюють узгоджено.

Таблиця 2.1 - Порівняльний аналіз переваг, недоліків та сфер застосування різних технологій керування ПВТ

Технологія керування	Ключові характеристики/Принцип дії	Переваги для ПВТ	Недоліки/Обмеження	Типові сфери застосування/Умови доцільності	Вимоги до даних та інфраструктури
Одноконтурна ПІД	Класичний ПІД-алгоритм, один контур регулювання.	Простота реалізації, низька вартість.	Низька якість регулювання для інерційних об'єктів, погана компенсація збурень, потрібне точне налаштування.	Прості об'єкти з малою інерційністю, де не потрібна висока точність.	Мінімальні: датчик, регулятор, виконавчий механізм.
Каскадна АСК	Два (або більше) контури регулювання; вихід зовнішнього є завданням для внутрішнього.	Покращена компенсація збурень, вища точність та швидкість реакції для інерційних об'єктів.	Складніша структура, вища вартість, складніше налаштування, потенційно нижча надійність.	Об'єкти з великою інерційністю та наявністю проміжної швидкодіючої координати (напр., витрата пари).	Два датчики, два регулятори, один виконавчий механізм.
МРС (Модельно-прогнозуюче керування)	Використання математичної моделі для прогнозування та оптимізації керуючих дій на горизонті, врахування обмежень.	Ефективне керування багатозв'язними, інерційними об'єктами; оптимізація за економічними критеріями; врахування обмежень.	Складність розробки та налаштування моделі; високі обчислювальні вимоги; чутливість до точності моделі.	Складні технологічні процеси, де потрібна висока ефективність та врахування багатьох факторів.	Точна математична модель об'єкта, дані в реальному часі, потужні обчислювальні ресурси.
Fuzzy Logic (Нечітка логіка)	Керування на основі лінгвістичних правил "ЯКЩО-ТО", що імітують досвід експерта.	Робастність до неточностей моделі та шумів; можливість використання експертних знань; добре працює для нелінійних систем.	Складність формування бази правил; налаштування функцій належності; відсутність формальних методів аналізу стійкості.	Об'єкти зі складною, нечітко визначеною динамікою, де важко отримати точну модель.	Експертні знання про процес, датчики.
Neuro-PID (Нейро-ПІД)	ПІД-регулятор, коефіцієнти якого динамічно налаштовуються нейронною мережею.	Адаптивність до змінних умов та параметрів об'єкта; покращена якість регулювання для нелінійних та нестационарних систем.	Складність навчання нейронної мережі; вимоги до даних для навчання; потенційна проблема "чорної скриньки".	Об'єкти зі змінною або невідомою динамікою, де потрібна адаптація ПІД-регулятора.	Дані для навчання НМ, ПІД-структура.
ШІ/МН-орієнтовані системи	Використання алгоритмів машинного навчання (нейронні мережі, дерева рішень, підкріплювальне навчання тощо) для прогнозування, оптимізації, діагностики.	Здатність навчатися на даних, виявляти складні залежності, адаптуватися, прогнозувати несправності.	Вимоги до великих обсягів якісних даних; складність інтерпретації деяких моделей; обчислювальна складність навчання.	Прогнозування параметрів, оптимізація режимів, предиктивне обслуговування, діагностика.	Великі масиви даних (історичних та реального часу), обчислювальні ресурси.
Digital Twins (Цифрові двійники)	Створення віртуальної копії фізичного об'єкта, що оновлюється в реальному часі, для моніторингу, симуляції, оптимізації та діагностики.	Комплексний моніторинг; можливість тестування без ризику; оптимізація; предиктивне обслуговування; навчання персоналу.	Висока складність розробки та підтримки; значні вимоги до даних та обчислювальних ресурсів; вартість.	Комплексне управління життєвим циклом важливих активів, оптимізація складних систем.	Детальна модель об'єкта, дані з датчиків в реальному часі, потужна платформа для симуляції та аналізу.

Незважаючи на очевидні переваги, впровадження новітніх технологій пов'язане з певними викликами. До них належать складність розробки та налаштування таких систем, високі початкові інвестиції, значні вимоги до якості та обсягу даних для навчання моделей, а також до обчислювальних ресурсів. Крім того, існує проблема інтерпретованості рішень, прийнятих деякими ШІ-моделями ("чорні скриньки"), що може бути перешкодою для їх використання в критично важливих системах керування. Тому вибір конкретної технології та стратегії її впровадження повинен базуватися на ретельному техніко-економічному аналізі, оцінці ризиків та наявності кваліфікованого персоналу.

Висновки до розділу

Аналіз існуючих технологій керування підігрівачами високого тиску свідчить про значну еволюцію підходів: від ручного управління та простих одноконтурних ПІД-регуляторів до складних автоматизованих систем управління технологічними процесами. Встановлено, що одноконтурні системи регулювання температури живильної води мають суттєві недоліки, пов'язані з великою інерційністю об'єкта, що негативно впливає на якість та економічність процесу підігріву.

Застосування каскадних систем автоматичного керування, де внутрішній швидкодіючий контур стабілізує проміжний параметр (витрату гріючої пари), дозволяє значно покращити динамічні характеристики системи, підвищити точність підтримання температури живильної води та ефективніше компенсувати збурення.

Подальший розвиток систем керування ПВТ пов'язаний із впровадженням передових інтелектуальних технологій. Модельно-прогнозуюче керування (MPC) відкриває можливості для оптимального керування багатозв'язними та інерційними процесами з урахуванням обмежень. Системи на основі штучного інтелекту та машинного навчання (ШІ/МН) дозволяють реалізувати функції прогнозування, адаптивної оптимізації та ранньої діагностики несправностей. Нечітка логіка (Fuzzy Logic) та нейро-ПІД регулятори (Neuro-PID) пропонують

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективні рішення для об'єктів зі складною нелінійною динамікою та в умовах невизначеності. Концепція цифрових двійників (Digital Twins) надає інструменти для комплексного моніторингу, симуляції, оптимізації режимів роботи та предиктивного обслуговування ПВТ.

Зроблено висновок, що впровадження каскадної системи автоматичного регулювання температури живильної води на виході з ПВТ-7 на базі сучасних мікропроцесорних пристроїв та з використанням удосконалених методів налаштування теоретично повинно забезпечити безаварійну роботу обладнання та самих підігрівачів, а також покращення техніко-економічних показників роботи системи регенерації високого тиску та енергоблоку в цілому. Перспективи подальшого підвищення ефективності пов'язані з інтеграцією елементів інтелектуального керування.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБКА ТА ВАЛІДАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДІГРІВАЧА ВИСОКОГО ТИСКУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Розробка ефективної системи автоматичного керування неможлива без адекватного математичного опису об'єкта керування. Математична модель дозволяє дослідити динамічні властивості об'єкта, провести синтез регуляторів та оцінити якість їх роботи ще на етапі проектування. У даному розділі представлено процес вибору об'єкта керування, ідентифікації його ключових параметрів та експериментального визначення динамічних характеристик з подальшим отриманням передавальних функцій.

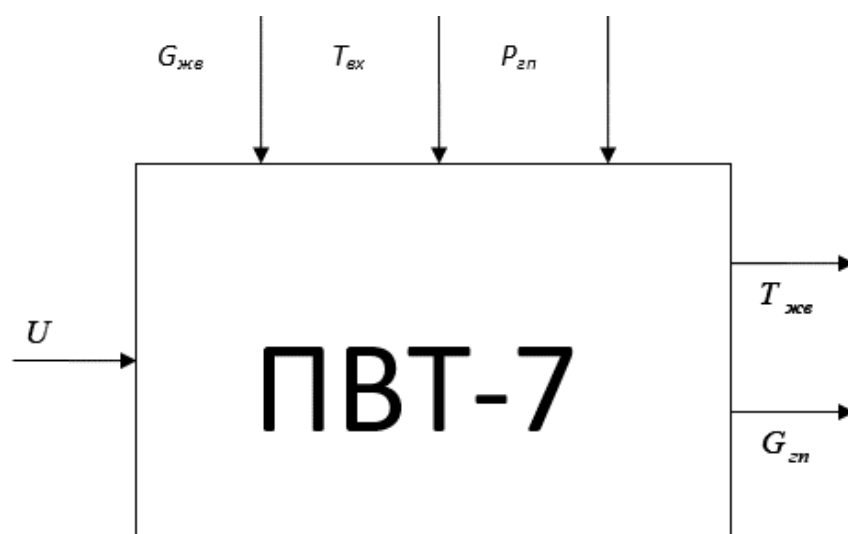
3.1 Обґрунтування вибору конкретного підігрівача (ПВТ-7) як об'єкта для дослідження та автоматизації

Для розробки та дослідження системи автоматичного регулювання температури живильної води в якості об'єкта керування було обрано підігрівач високого тиску ПВТ-7. Цей вибір обґрунтований кількома факторами. По-перше, ПВТ-7 є останнім підігрівачем у технологічному ланцюгу системи регенерації високого тиску перед подачею живильної води безпосередньо в паровий котел. Температура живильної води на виході з ПВТ-7 є критично важливим параметром, який повинен підтримуватися в строго визначеному діапазоні для забезпечення номінальних параметрів перегрітої пари на виході з котла та ефективної роботи турбіни. По-друге, саме на виході з ПВТ-7 контролюється кінцева температура живильної води всієї системи регенерації високого тиску, що робить його ключовим елементом для оцінки ефективності та стабільності роботи всього комплексу ПВТ. Таким чином, ПВТ-7 є репрезентативним об'єктом, автоматизація якого має найбільший вплив на загальні показники роботи енергоблоку.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Ідентифікація та аналіз основних збурюючих впливів, каналів регулювання та ключових вихідних координат об'єкта

Для побудови математичної моделі ПВТ-7 необхідно ідентифікувати основні фактори, що впливають на процес підігріву живильної води, а також визначити канали, через які здійснюється керування, та вихідні координати, що підлягають контролю. Згідно з аналізом для ПВТ-7 визначено наступні елементи (рисунок 3.1).



$G_{жв}$ – витрата живильної води; $T_{вх}$ – вхідна температура живильної води;
 $P_{гп}$ – тиск гріючої пари; $T_{жв}$ – температура живильної води після підігрівача; $G_{гп}$ – витрата гріючої пари; U – ступінь відкриття клапану на лінії подачі гріючої пари.

Рисунок 3.1 - Структурна схема підігрівача високого тиску

Збурюючі фактори (впливи): $G_{жв}$ – витрата живильної води через підігрівач. Зміна навантаження енергоблоку призводить до зміни $G_{жв}$, що безпосередньо впливає на інтенсивність теплообміну та кінцеву температуру води; $T_{вх}$ – вхідна температура живильної води (тобто температура на виході з попереднього підігрівача ПВТ-6). Коливання цього параметра також є збуренням для ПВТ-7; $P_{гп}$ – тиск гріючої пари, що надходить з відповідного відбору турбіни. Зміна $P_{гп}$ впливає на температуру насичення пари і, відповідно, на температурний напір та

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

інтенсивність конденсації.

Регулююча дія (керуючий вплив): U – ступінь відкриття регулюючого клапана на лінії подачі гріючої пари в ПВТ-7. Змінюючи U , система автоматизації впливає на витрату гріючої пари.

Вихідні координати (регульовані параметри): $T_{жв}$ – температура живильної води на виході з ПВТ-7. Це основний регульований параметр, який необхідно підтримувати на заданому рівні; $G_{гп}$ – витрата гріючої пари, що подається в ПВТ-7. Цей параметр є важливим для каскадних систем керування, де він виступає як проміжна (коригуюча) координата, що стабілізується внутрішнім контуром регулювання.

Аналіз цих параметрів показує, що ПВТ-7 є складним об'єктом з кількома вхідними збуреннями та взаємопов'язаними вихідними координатами. Для ефективного керування необхідно враховувати динаміку процесів по кожному з каналів впливу.

3.3 Опис методології та умов проведення експериментального дослідження динамічних характеристик ПВТ

Для отримання математичної моделі ПВТ-7, яка б адекватно відображала його динамічні властивості, було обрано метод експериментального дослідження. Математичні методи визначення динамічних характеристик можуть не враховувати всієї складності реальних процесів та різноманітних збурюючих впливів, що призводить до похибок. Експериментальний підхід дозволяє отримати характеристики безпосередньо з працюючого обладнання.

Методологія проведення активного експерименту передбачала наступні етапи:

1. Підготовка об'єкта та вимірювальної апаратури: Перед початком експерименту необхідно було забезпечити стабільний режим роботи енергоблоку та ПВТ-7. Було усунуто або мінімізовано вплив сторонніх збурень, не пов'язаних з експериментальним впливом. Для реєстрації зміни вихідних величин (температури живильної води та витрати гріючої пари) використовувалася

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реєструюча апаратура високого класу точності (не нижче 0.5), що забезпечує достатню швидкодію та надійність. Хоча в згадується "спеціальний реєструючий прилад з розтягнутою лінійною шкалою та діаграмною стрічкою", в сучасних умовах для таких завдань доцільно використовувати цифрові системи збору даних (DAQ), промислові контролери (ПЛК) з функцією логування або SCADA-системи. Ці засоби дозволяють автоматизовано записувати параметри з високою частотою дискретизації, точністю та можливістю подальшої цифрової обробки. Перед експериментом всі датчики повинні бути належним чином відкалібровані.

2. Планування експерименту: В якості досліджуваного вхідного впливу було обрано ступінчасту зміну подачі гріючої пари шляхом зміни положення регулюючого органу (клапана). Амплітуда ступінчастого впливу (відкриття РО) була обрана в діапазоні 10-20% від максимального ходу, що є стандартним підходом для ідентифікації лінійних моделей і дозволяє отримати достатньо інформативний відгук системи без створення ризику для обладнання (рисунок 3.2).

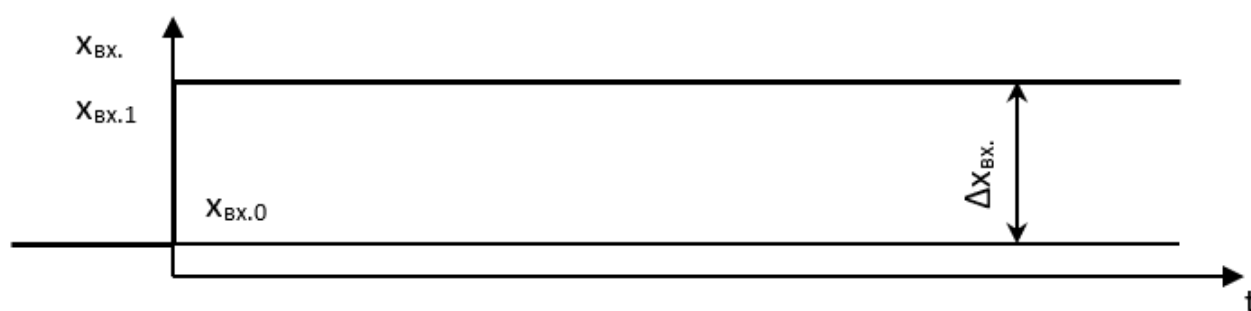


Рисунок 3.2 – Детермінований збурюючий вплив

3. Проведення експерименту: Об'єкт виводився на сталий режим роботи, який характеризувався постійністю вихідної змінної (температури $T_{жв}$) та всіх змінних, що впливають на неї. Цей режим витримувався протягом 2-2.5 хвилин для стабілізації. Потім здійснювався ступінчастий вплив – регулюючий орган на лінії подачі гріючої пари відкривався на 15%. З цього моменту починалася безперервна реєстрація зміни вихідних величин ($T_{жв}$ та $G_{гп}$) у часі. Експеримент вважався закінченим, коли вихідна величина ($T_{жв}$) досягала нового усталеного

значення (в даному випадку, цільова температура 240 °C) і залишалася практично незмінною. Для підвищення достовірності результатів експеримент проводився двічі.

4. Обробка експериментальних даних: Отримані в ході експериментів дані (залежності $T_{жв}(t)$ та $G_{гп}(t)$) піддавалися усередненню (за результатами двох дослідів) та згладжуванню для усунення випадкових шумів та похибок вимірювань. Для обробки даних доцільно використовувати сучасні програмні пакети, такі як MATLAB, Python з бібліотеками SciPy, Pandas, або спеціалізоване ПЗ для аналізу часових рядів, що дозволяє застосовувати ефективні алгоритми фільтрації та згладжування.

Точність експериментально отриманої математичної моделі є критично важливою для ефективності будь-якої системи керування, особливо для модельно-орієнтованих підходів, таких як MPC або Digital Twins. Неадекватна модель неминуче призведе до субоптимального або навіть нестабільного керування. Тому, хоча експериментальний метод ідентифікації, є класичним, його ретельне виконання та подальша валідація отриманої моделі є фундаментальним етапом, важливість якого лише зростає з впровадженням більш складних систем керування. Також важливою є стаціонарність умов під час проведення експерименту. Однак, реальні ПВТ часто працюють в умовах змінних навантажень та параметрів, що вказує на потенційну потребу в адаптивних моделях або періодичній переідентифікації об'єкта в процесі експлуатації для підтримки точності моделі.

3.4 Аналіз та інтерпретація результатів експерименту, побудова та згладжування перехідних характеристик

Після проведення експериментів та первинної обробки даних було отримано масиви значень температури живильної води та витрати гріючої пари в залежності від часу. Ці дані, усереднені та згладжені, наведені в таблиці 3.1.

Для подальшого аналізу та отримання передавальних функцій експериментальні криві розгону були приведені до безрозмірних (відносних)

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

одиниць. Це дозволяє усунути вплив абсолютних значень параметрів та початкових умов, а також полегшує порівняння характеристик, отриманих в різних умовах.

Таблиця 3.1 - Результати експерименту (фрагмент)

Т, СЕК	СТУПІНЬ ВІДКРИТТЯ РО, %	ТЕМПЕРАТУРА ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ Т _{ЖВ} , °С	ТЕМПЕРАТУРА ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ Т _{ЖВ} , ОД.	ВИТРАТА ГРІЮЧОЇ ПАРИ G _{ГП} , КГ/С	ВИТРАТА ГРІЮЧОЇ ПАРИ G _{ГП} , ОД.
0	15	214	0	6	0
20	15	214,2	0,0076	6,2	0,133
40	15	214,4	0,015	6,65	0,433
...	...	...	...	...	...
340	15	240	1	7,5	1
360	15	240	1	7,5	1
380	15	240	1	7,5	1

Перерахунок здійснювався за формулами:

$$x_{ex.i}^* = \frac{x_{ex.i} - x_{ex.0}}{x_{ex.max} - x_{ex.0}}; \quad (3.1)$$

$$y_{vix.i}^* = \frac{y_{vix.i} - y_{vix.0}}{y_{vix.(∞)} - y_{vix.0}}, \quad (3.2)$$

де $x_{ex.i}$, $y_{vix.i}$ – біжуче значення вхідної і вихідної величини в розмірних одиницях;

$x_{ex.0}$, $y_{vix.0}$ – значення вхідної і вихідної величини в розмірних одиницях до моменту нанесення збурення на керований об'єкт;

$x_{ex.max}$, $y_{vix.(∞)}$ – максимальне значення вхідної та вихідної величини в розмірних одиницях.

Розрахунок та побудова графіків перехідних процесів у безрозмірних одиницях виконувалися за допомогою програмного пакету MathCAD, хоча для цих цілей можуть бути використані й інші аналогічні програмні засоби,

наприклад, MATLAB або Python з бібліотекою Matplotlib.

3.5 Методика визначення передавальних функцій об'єкта по основному та допоміжному каналах регулювання, оцінка адекватності та точності отриманих моделей

На основі отриманих експериментальних перехідних характеристик у безрозмірних одиницях було проведено апроксимацію цих кривих аналітичними виразами, що відповідають передавальним функціям типових динамічних ланок. Для знаходження параметрів передавальних функцій по каналах регулювання температури живильної води та витрати гріючої пари використовувалося спеціалізоване програмне забезпечення. Такі програми зазвичай реалізують чисельні методи ідентифікації систем, наприклад, метод найменших квадратів (МНК) або його модифікації, які дозволяють підібрати параметри теоретичної моделі (передавальної функції) таким чином, щоб її відгук найкращим чином відповідав експериментальним даним.

В результаті апроксимації було отримано наступні передавальні функції: По каналу регулювання температури живильної води (канал "зміна ступеня відкриття клапана U – зміна температури $T_{жв}$ "):

$$W_0(p) = \frac{1}{334657.57p^3 + 10885.562p^2 + 163.927p + 1} \quad (3.3)$$

Ця передавальна функція описує динаміку основного, більш інерційного каналу керування. Вона являє собою аперіодичну ланку третього порядку.

По каналу регулювання витрати гріючої пари (канал "зміна ступеня відкриття клапана U – зміна витрати $G_{гп}$ "):

$$W_1(p) = \frac{-4.124p + 1}{650.024p^2 + 46.008p + 1} \quad (3.4)$$

Ця передавальна функція описує динаміку допоміжного, менш інерційного каналу, який буде використовуватися у внутрішньому контурі каскадної системи керування. Вона являє собою аперіодичну ланку першого порядку.

Оцінка адекватності отриманих моделей проводилася шляхом порівняння відгуків моделей з експериментальними перехідними характеристиками. Згідно з ,

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

максимальна похибка апроксимації для обох каналів не перевищувала 2.5% і становила 1.9% в точці $t=60$ с. Така точність вважається задовільною для цілей подальшого синтезу систем автоматичного керування.

Висновки до розділу

У даному розділі було виконано математичний опис підігрівача високого тиску ПВТ-7 як об'єкта автоматизації. Обґрунтовано вибір ПВТ-7, визначено його основні збурюючі впливи, канали регулювання та ключові вихідні координати, а також представлено структурну схему об'єкта.

Детально описано методологію та умови проведення експериментального дослідження динамічних характеристик ПВТ, наголошено на перевагах експериментального підходу та можливостях використання сучасних засобів збору та обробки даних. Проаналізовано результати активного експерименту, наведені у вигляді табличних даних та графіків перехідних характеристик.

На основі експериментальних даних за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення було визначено передавальні функції об'єкта по основному каналу регулювання (температура живильної води) та допоміжному каналу (витрата гріючої пари). Оцінка точності апроксимації показала, що максимальна похибка не перевищує 2.5%, що є прийнятним для подальшого синтезу та аналізу систем автоматичного керування. Отримані математичні моделі слугуватимуть основою для розробки та дослідження одноконтурної та каскадної АСК у наступному розділі.

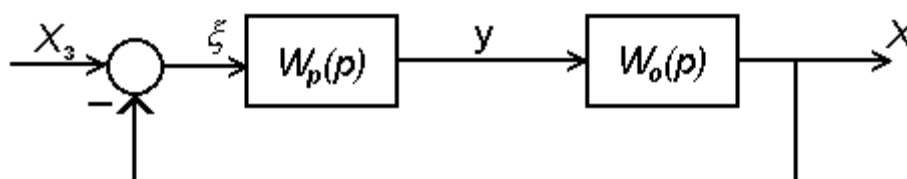
					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

4 СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ЖИВИЛЬНОЇ ВОДИ

На основі математичних моделей, отриманих у попередньому розділі, проводиться синтез та аналіз систем автоматичного керування (АСК) температурою живильної води для підігрівача високого тиску ПВТ-7. Розглядаються як традиційна одноконтурна система, так і більш досконала каскадна система. Проводиться розрахунок оптимальних параметрів регуляторів, дослідження стійкості та оцінка якості керування, а також надаються рекомендації щодо технічної реалізації вдосконаленої системи на сучасній елементній базі.

4.1 Розрахунок, оптимізація та аналіз ефективності ПД-регуляторів для одноконтурної АСР

Одноконтурна система автоматичного регулювання (АСР) є найпростішим варіантом автоматизації процесу підтримання температури живильної води. Її спрощена структурна схема наведена на рисунок 4.1. У такій системі регулятор безпосередньо впливає на об'єкт керування на основі сигналу розбалансу між заданим та фактичним значенням регульованого параметра.



X_z - сигнал завдання; X - вихідний сигнал; ζ - розбаланс;
 $W_p(p)$ - передавальна функція регулятора; $W_o(p)$ - передавальна функція
керуваного об'єкта

Рисунок 4.1 - Спрощена структурна схема одноконтурної АСК

Для регулювання температури живильної води в даній роботі

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

використовується пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання. Вибір ПІД-регулятора обґрунтований його універсальністю та здатністю забезпечувати високу якість регулювання для широкого класу об'єктів. Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію на розбаланс, інтегральна складова усуває статичну похибку в усталеному режимі, а диференціальна складова покращує динаміку перехідного процесу, протидіючи швидким змінам регульованої величини та зменшуючи перерегулювання. Передавальна функція ідеального ПІД-регулятора має вигляд:

$$W_p(p) = \frac{C_2 p^2 + C_1 p + C_0}{p}, \quad (4.1)$$

де $C_0 = K_p$, $C_1 = K_p/T_i$, $C_2 = K_p T_d$, K_p – коефіцієнт підсилення, T_i – час інтегрування, T_d – час диференціювання.

Для розрахунку оптимальних параметрів налаштування ПІД-регулятора (C_0 , C_1 , C_2) використовувалася передавальна функція об'єкта керування по каналу регулювання температури живильної води, отримана в Розділі 3:

$$W_0(p) = \frac{1}{334657.57 p^3 + 10885.562 p^2 + 163.927 p + 1} e^{-10p} \quad (4.2)$$

Розрахунок параметрів налаштування проводився за допомогою спеціалізованої програми. Отримано наступні значення параметрів: $C_0 = 0.337$, $C_1 = 65.94$, $C_2 = 3.0$. Тоді передавальна функція ПІД-регулятора для одноконтурної АСР набуває вигляду:

$$W_p(p) = \frac{3p^2 + 65.94p + 0.337}{p}. \quad (4.3)$$

Аналіз ефективності такої одноконтурної системи показує, що, незважаючи на використання ПІД-регулятора, її можливості обмежені значною інерційністю самого об'єкта керування (ПВТ-7). Це може призводити до повільної реакції на збурення та неоптимальних перехідних процесів, що було обговорено в Розділі 2.2. Для більш точної оцінки якості регулювання необхідно провести моделювання перехідних процесів, що буде зроблено в п. 4.5.

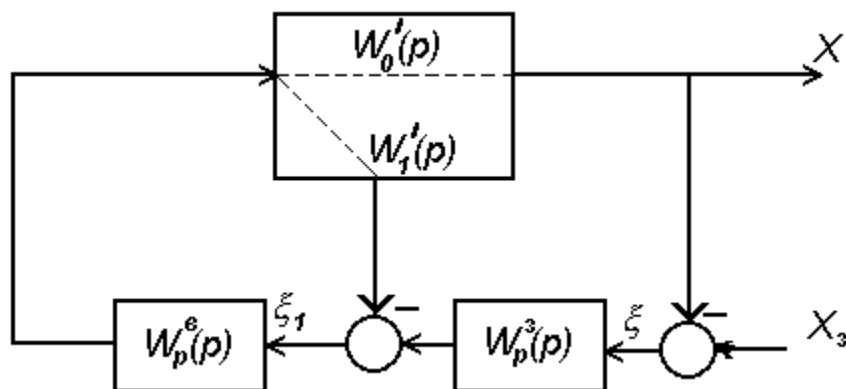
Варто зазначити, що окрім класичних методів розрахунку параметрів ПІД-регуляторів (наприклад, методи Циглера-Нікольса, частотні методи), існують і

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більш сучасні підходи. До них належать методи, засновані на оптимізації (наприклад, з використанням генетичних алгоритмів або методів ройового інтелекту), адаптивні методи, які дозволяють регулятору підлаштовуватися під змінні умови роботи об'єкта, а також методи, що базуються на принципах модельно-прогнозуючого керування. Ці підходи можуть забезпечити вищу якість регулювання, особливо для складних та нестационарних об'єктів.

4.2 Синтез каскадної АСР: обґрунтування вибору структури, розрахунок та сучасні методи налаштування параметрів основного та допоміжного ПД-регуляторів

Як було показано в Розділі 2.3, для об'єктів з великою інерційністю, таких як ПВТ, значно кращу якість регулювання забезпечують каскадні системи автоматичного керування (АСК). Каскадна структура дозволяє ефективно компенсувати збурення, що діють на проміжних етапах процесу, та покращити динаміку системи в цілому. Структурна схема каскадної АСР для ПВТ-7 наведена на рисунок 4.2.



X_3 - сигнал завдання; X - вихідний сигнал; ζ - розбаланси по двох контурах; $W_p^e(p)$ - передавальна функція внутрішнього регулятора; $W_p^3(p)$ - передавальна функція зовнішнього регулятора; $W_1'(p)$ - передавальна функція керованого об'єкта по першому каналу (швидкодіючий контур); $W_o'(p)$ - передавальна функція керованого об'єкта по другому каналу (інерційний контур)

Рисунок 4.2 - Спрощена структурна схема каскадної АСК

У каскадній АСР для ПВТ-7 виділяються два контури регулювання. Зовнішній (основний) контур: Призначений для стабілізації основного регульованого параметра – температури живильної води на виході з ПВТ-7 ($T_{жв}$). Регулятор цього контуру (основний регулятор) отримує сигнал від датчика температури та порівнює його із заданим значенням. Для забезпечення нульової статичної похибки та високої якості перехідного процесу для основного регулятора доцільно використовувати ПД-закон регулювання.

Внутрішній (допоміжний) контур: Призначений для стабілізації проміжної координати – витрати гріючої пари ($G_{гп}$), що подається в ПВТ-7. Регулятор цього контуру (допоміжний регулятор) отримує завдання від основного регулятора та сигнал від датчика витрати гріючої пари. Оскільки від допоміжного регулятора потрібна перш за все швидкодія для оперативної компенсації збурень в каналі подачі пари, для нього може використовуватися П- або ПІ-закон регулювання. У даній роботі для допоміжного регулятора обрано ПІ-закон.

Передавальна функція об'єкта по основному каналу (каналу температури) залишається такою ж, як і для одноконтурної системи:

$$W_0(p) = \frac{1}{334657.57p^3 + 10885.562p^2 + 163.927p + 1} \quad (4.3)$$

Передавальна функція об'єкта по допоміжному каналу (каналу витрати гріючої пари):

$$W_1(p) = \frac{-4.124p + 1}{650.024p^2 + 46.008p + 1} \quad (4.4)$$

Розрахунок параметрів налаштування регуляторів каскадної АСК проводився послідовно, починаючи з внутрішнього контуру, або за допомогою спеціалізованих програм, що дозволяють одночасну оптимізацію.

Еквівалентна схема для каскадної системи представлена на рисунку 4.3.

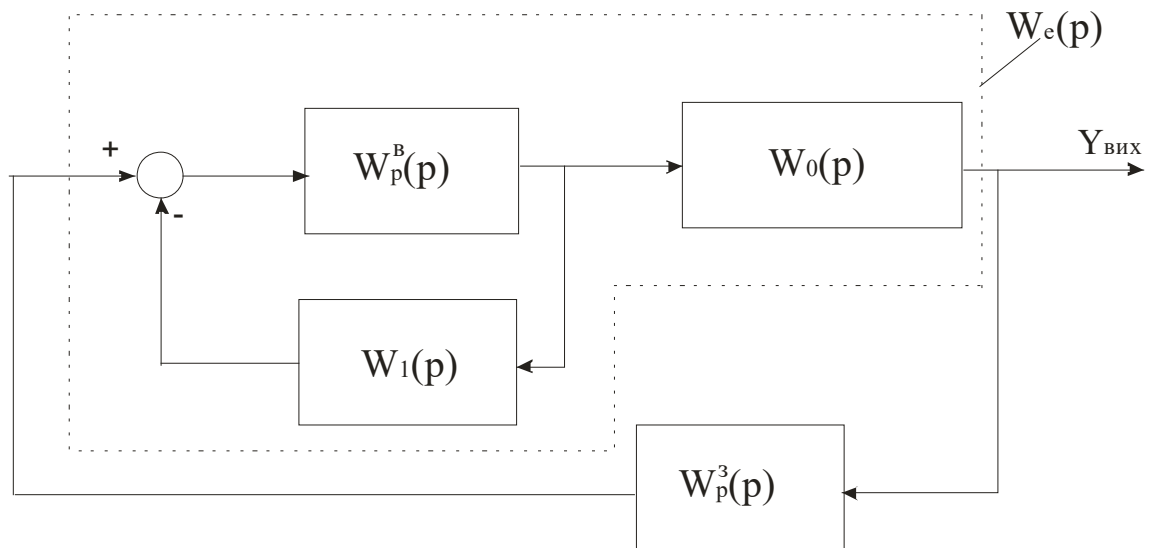


Рисунок 4.3 - Структурна схема еквівалентної каскадної АСК

Передавальна функція для даного об'єкта має вигляд:

$$W_e'(p) = \frac{W_p^e(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_p^e(p)} W_0(p). \quad (4.5)$$

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

$$\frac{1}{(W_p^e(j\omega))} \ll (W_1(j\omega)). \quad (4.6)$$

Враховуючи (4.6) можна записати, що $W_e'(p) = \frac{W_0(p)}{W_1(p)}$. Враховуючи значення $W_0(p)$ і $W_1(p)$, отримаємо:

$$W_e'(p) = \frac{1}{\frac{334657.57p^3 + 10885.562p^2 + 163.927p + 1}{-4.124p + 1} \cdot \frac{650.024p^2 + 46.008p + 1}{1380128p^4 + 289765p^3 + 10209p^2 + 159.8p + 1}} \quad (4.7)$$

Після деяких математичних перетворень отримаємо:

$$W_e'(p) = \frac{650.024p^2 + 46.008p + 1}{1380128p^4 + 289765p^3 + 10209p^2 + 159.8p + 1} \quad (4.8)$$

Параметри налаштування основного (зовнішнього) ПД-регулятора (по

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

температурі): Згідно з розрахунками, отримано: $C_{03}=0.014$ $C_{13}=16.48$ $C_{23}=1.0$

Передавальна функція основного регулятора:

$$W_p^3(p) = \frac{p^2 + 16.4837p + 0.014}{p}. \quad (4.9)$$

Параметри налаштування допоміжного (внутрішнього) ПІ-регулятора (по витраті гріючої пари). Передавальна функція для такого об'єкту має вигляд:

$$W_e''(p) = -W_1(p) + W_0(p) \cdot W_p^3(p). \quad (4.10)$$

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

$$W_e''(p) = -\frac{-4.124p + 1}{650.024p^2 + 46.008p + 1} + \frac{1}{334657.57p^3 + 10885.562p^2 + 163.927p + 1} \cdot \frac{p^2 + 16.48p + 0.014}{p}$$

Після деяких математичних перетворень отримаємо:

$$W_e''(p) = \frac{1380778p^4 - 279004p^3 - 9441p^2 - 142.7p - 0.986}{217535452p^6 + 22472801p^5 + 942036p^4 + 19077p^3 + 209.9p^2 + p}.$$

Згідно з розрахунками, отримано: $C_{0в}=0.0001$ $C_{1в}=157.54$ Передавальна функція допоміжного регулятора:

$$W_p^e(p) = \frac{157.54p + 0.0001}{p}. \quad (4.11)$$

Еквівалентна передавальна функція замкненого внутрішнього контуру, який є об'єктом для зовнішнього регулятора, може бути визначена, але для синтезу часто використовують спрощені підходи або методи одночасного налаштування. Еквівалентна передавальна функція всієї замкненої каскадної АСР для аналізу має вигляд:

$$W_e(p) = \frac{W_p^3(p) \cdot W_0(p) \cdot W_p^e(p)}{W_p^3(p) \cdot W_0(p) \cdot W_p^e(p) + W_1(p) \cdot W_p^e(p) + 1}. \quad (4.12)$$

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

$$W_e(p) = \frac{-361373725600p^7 - 17906591520p^6 - 279596449p^5 - 1845465.9p^4 - 3559.2p^3 + 10.3p^2 + 0.0044p + 5 \cdot 10^{-5}}{63106274300000p^8 + 1282884346000p^7 + 950564139p^6 + 601405109p^5 + 2049948p^4 + 6148.6p^3 + 23.2p^2 + 0.05p + 5 \cdot 10^{-5}}$$

Вибір та налаштування регуляторів у каскадних системах є компромісом між швидкодією, точністю, робастністю та складністю реалізації. Хоча каскадна

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

система теоретично забезпечує кращу якість, її практичне впровадження та налаштування вимагає глибших знань та більш досконалих інструментів порівняно з одноконтурною системою. Неправильне налаштування може призвести до взаємного негативного впливу контурів, коливань або навіть втрати стійкості.

4.3 Комплексне дослідження стійкості розроблених одноконтурної та каскадної АСР

Дослідження стійкості є обов'язковим етапом при проектуванні будь-якої системи автоматичного керування, оскільки нестійка система не може виконувати свої функції та може призвести до аварійних ситуацій. У даній роботі стійкість одноконтурної та каскадної АСР досліджувалася за допомогою алгебраїчного критерію Гурвіца та частотного критерію Найквіста.

Дослідження стійкості одноконтурної АСР. Дослідження здійснимо за критерієм стійкості Найквіста. Цей критерій базується на аналізі амплітудно-фазової характеристики (АФХ) розімкнутої системи $W_{роз}(p) = W_p(p) \cdot W_{ол}(p)$. АФХ будувалася в програмному пакеті MathLAB шляхом підстановки $p = j\omega$ та обчислення дійсної ($Re(\omega)$) та уявної ($Im(\omega)$) частин для діапазону частот ω від 0 до ∞ .

Передавальна функція розімкнутого контура має вигляд:

$$W_{роз}(p) = \frac{3p^2 + 65.9p + 0.337}{334657.57p^4 + 10885.562p^3 + 163.927p^2 + p}$$

Здійснимо підстановку: $p = j\omega$

$$W_{роз}(j\omega) = \frac{-3\omega^2 + 65.9j\omega + 0.337}{334657.57\omega^4 - 10885.562j\omega^3 - 163.927\omega^2 + j\omega}$$

Для побудови амплітудно-фазової характеристики використаємо програмний пакет MathLAB. Для початку створимо М-файл в такому вигляді.

```
s=w*i;
H=(3*s.^2+65.9*s+0.337)/(334657.57*s.^4+10885.562*s.^3+163.927*s.^2+s);
Im=imag(H);
Re=real(H);
plot(Re,Im);
```

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Запустимо на виконання і отримаємо такий графік АФХ (рисунок 4.4).

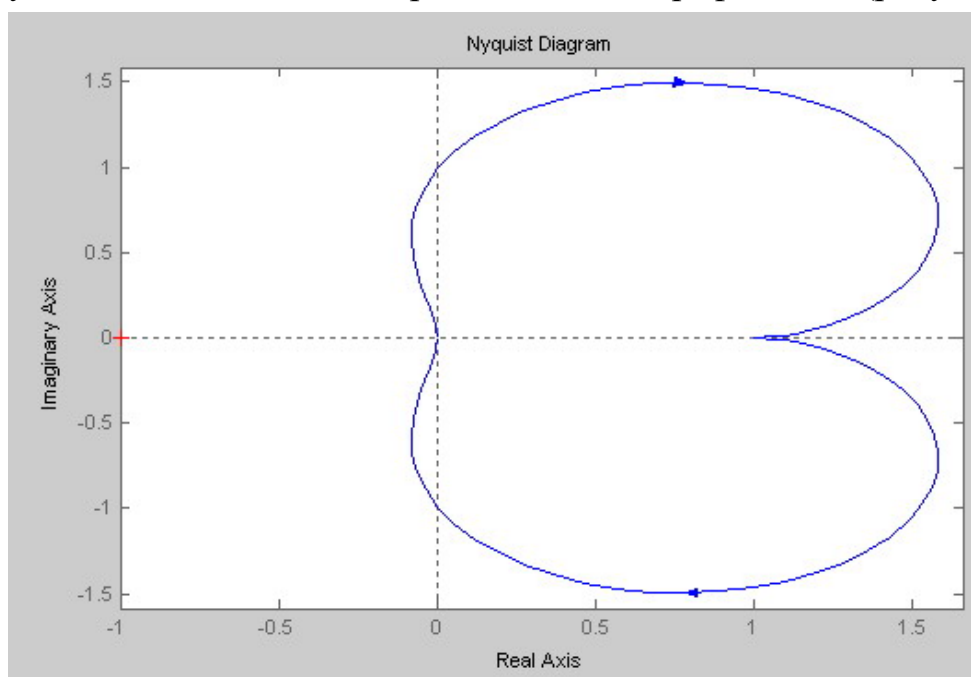


Рисунок 4.4 - АФХ розімкнутої одноконтурної системи

Згідно з рисунком 4.4 в , отримана АФХ не охоплює критичну точку $(-1; j0)$ на комплексній площині, що, відповідно до критерію Найквіста, свідчить про стійкість замкненої системи.

Дослідження стійкості каскадної АСР. Критерій Найквіста. АФХ розімкнутої каскадної системи (з розривом у зовнішньому контурі) будувалася в MathLAB. Передавальна функція розімкнутої системи для цього випадку:

$$W_e'(p) = \frac{W_p^6(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_p^6(p)} W_0(p) \cdot W_p^3(p).$$

З врахуванням передавальних функцій:

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

Згідно з рисунком 4.5, АФХ розімкнутої каскадної системи також не охоплює точку $(-1; j0)$, що підтверджує її стійкість.

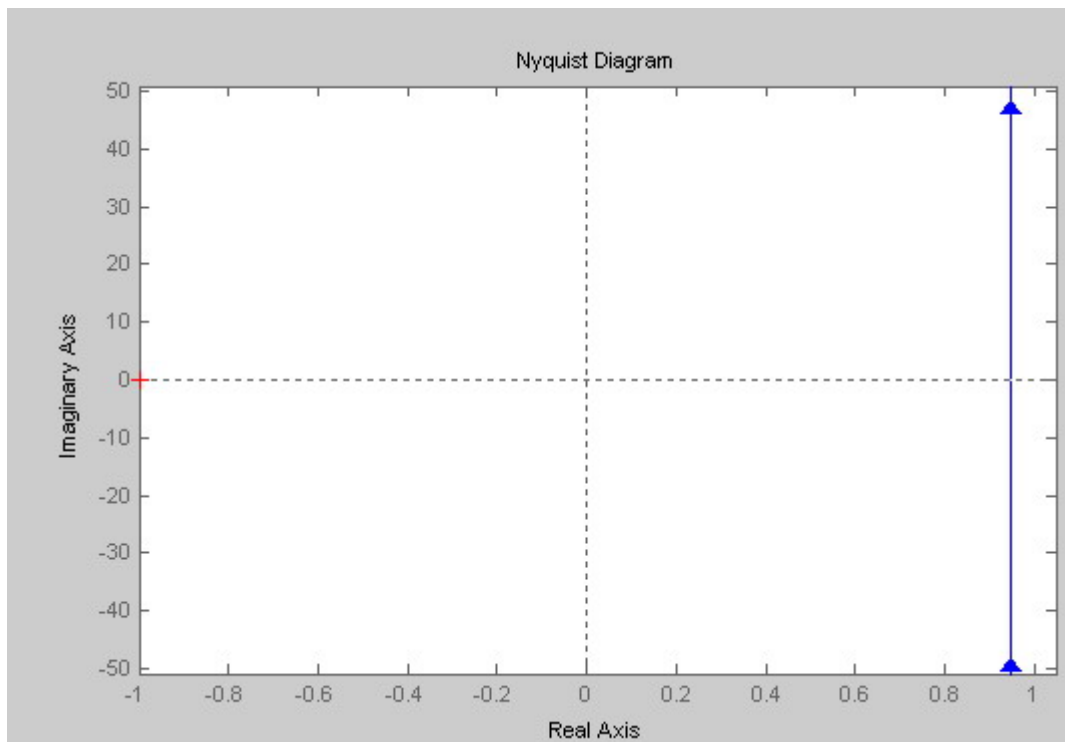


Рисунок 4.5 – АФХ розімкнутої каскадної системи

Сучасні програмні пакети, такі як MATLAB/Simulink, надають потужні інструменти для аналізу стійкості лінійних систем. Вони дозволяють автоматично розраховувати полюси та нулі передавальних функцій, будувати діаграми Боде, Найквіста, кореневі годографи, а також перевіряти виконання критеріїв стійкості, що значно спрощує та прискорює процес аналізу порівняно з ручними розрахунками або написанням спеціалізованих скриптів для кожного випадку.

4.4 Порівняльна оцінка якості керування одноконтурної та каскадної АСР за основними показниками перехідних процесів

Для порівняльної оцінки якості керування одноконтурної та каскадної АСР було проведено моделювання їх перехідних процесів у відповідь на одиничний ступінчастий вплив по завданню. Моделювання здійснювалося за допомогою програмного пакету MatLAB (Simulink), де були зібрані структурні схеми систем (рисунок 4.6 та рисунок 4.8) з використанням розрахованих передавальних

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

функцій об'єкта та регуляторів. Отримані графіки перехідних характеристик (рисунки 4.7 для одноконтурної та рисунок 4.9 для каскадної АСР) дозволили визначити основні прями показники якості регулювання:

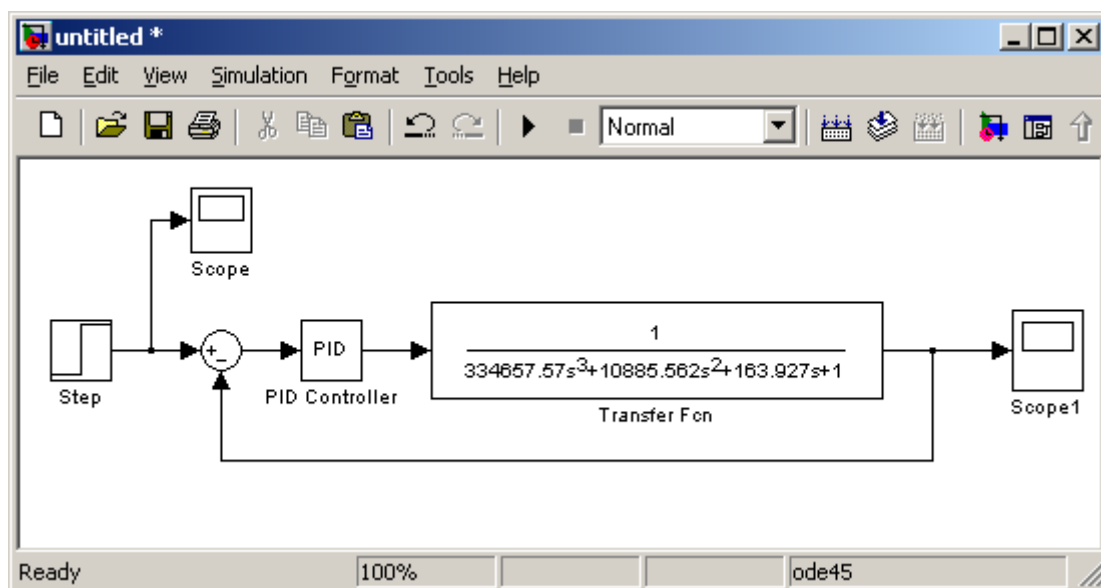
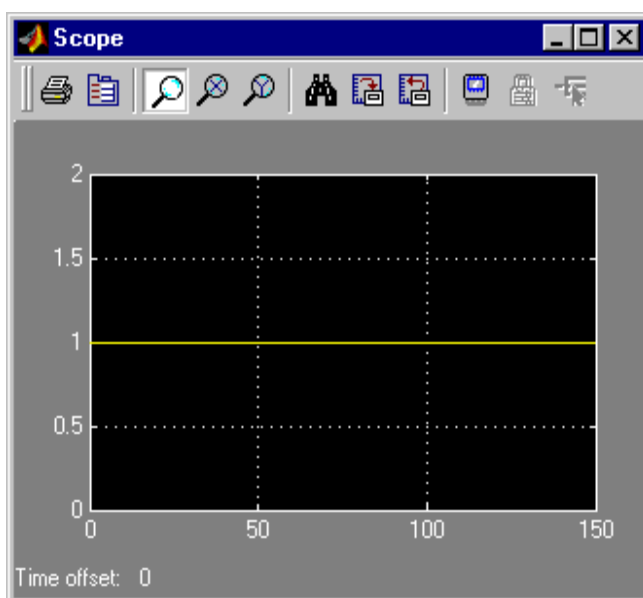
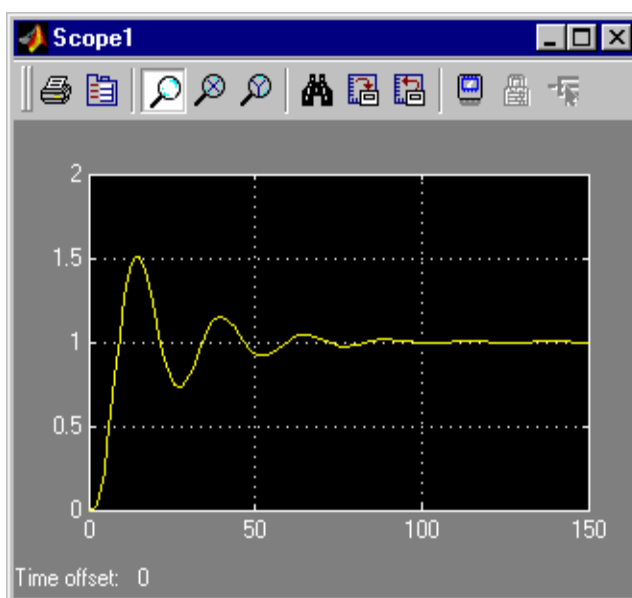


Рисунок 4.6 - Одноконтурна САК, змодельована в Matlab



Вхідний сигнал:



Вихідний сигнал

Рисунок 4.7 - Перехідна характеристика одноконтурної системи регулювання

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

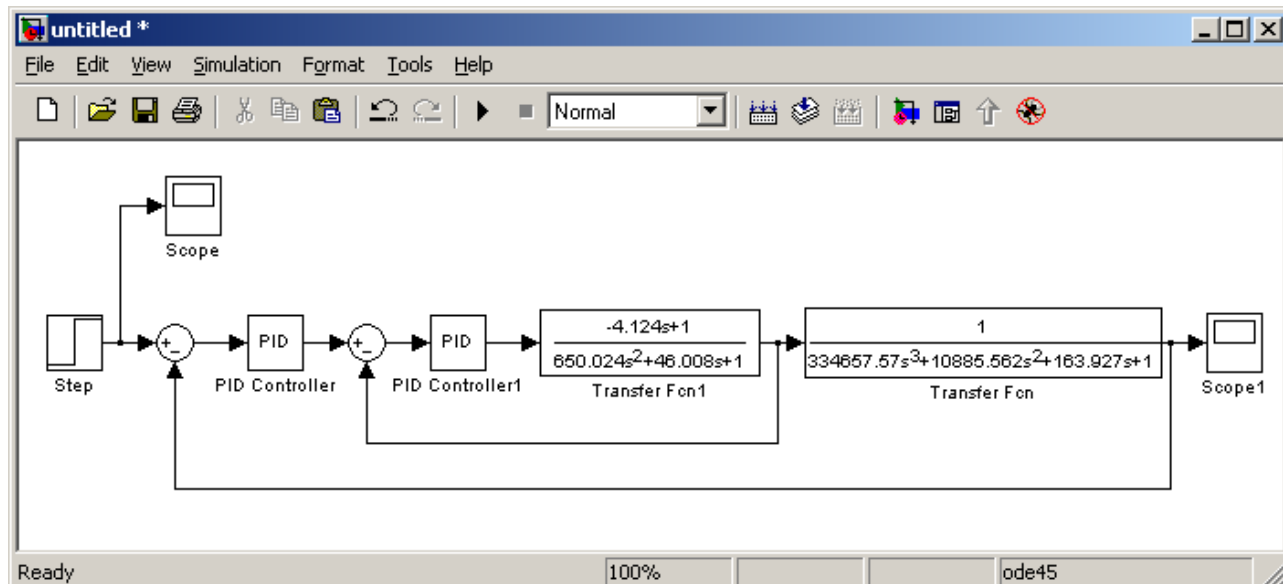
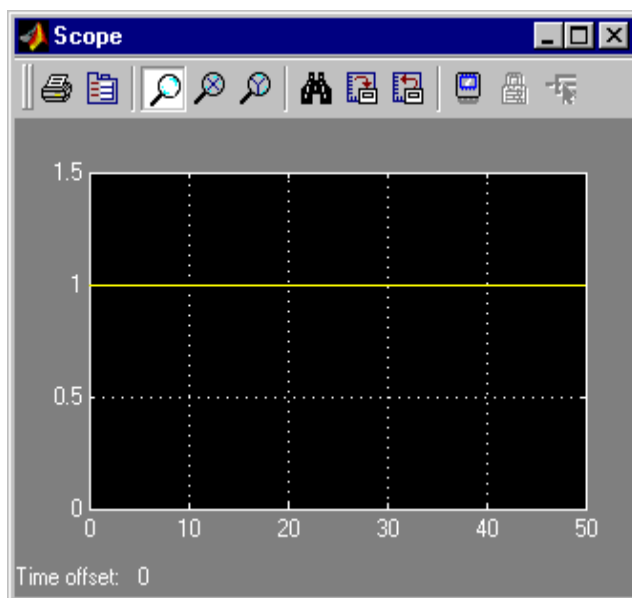
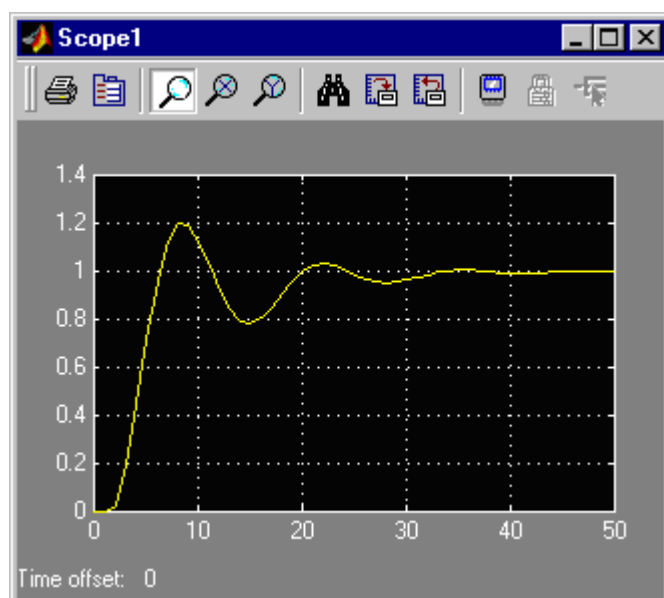


Рисунок 4.8 - Каскадна САК, змодельована в Matlab



Вхідний сигнал:



Вихідний сигнал

Рисунок 4.9 – Перехідна характеристика каскадної системи регулювання

1. *Тривалість перехідного процесу (t_p):* Час, необхідний для того, щоб регульована величина увійшла в зону $\pm 5\%$ (або іншу задану) від нового усталеного значення і більше з неї не виходила. Характеризує швидкодію системи.

- Для одноконтурної системи: $t_p=100\text{с}$
- Для каскадної системи: $t_p=40\text{с}$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

2. *Перерегулювання (σ):* Максимальне відхилення регульованої величини від нового усталеного значення, виражене у відсотках або відносних одиницях.
 $\sigma = x(\infty) - x_{\max} - x(\infty) \cdot 100\%$ (4.13)

- Для одноконтурної системи: $\sigma = 11.004 - 1 \cdot 100\% = 0.4\%$ (в вказано 0.004, що відповідає 0.4% при $x(\infty) = 1$)

- Для каскадної системи: $\sigma = 11.0004 - 1 \cdot 100\% = 0.04\%$ (в вказано 0.0004, що відповідає 0.04% при $x(\infty) = 1$)

3. *Ступінь затухання (ψ):* Відношення амплітуд двох послідовних відхилень одного знаку. Для аперіодичних або слабо коливальних процесів, як у даному випадку, цей показник близький до перерегулювання або не визначається. Розрахунок в дає:

- Для одноконтурної системи: $\psi = 0.004$
- Для каскадної системи: $\psi = 0.0004$

4. *Статична похибка ($\Delta x_{ст}$):* Відхилення регульованої величини в новому усталеному режимі від заданого значення. Завдяки наявності інтегральної складової в ПД-регуляторах, статична похибка для обох систем при ступінчастому впливі по завданню дорівнює нулю (або знаходиться в межах зони нечутливості, що в оцінено як $< 5\%$, що відповідає існуючим вимогам).

Аналіз отриманих показників якості однозначно свідчить про переваги каскадної системи автоматичного керування. Тривалість перехідного процесу для каскадної АСР у 2.5 рази менша, ніж для одноконтурної (40с проти 100с), що вказує на значно вищу швидкодію. Перерегулювання також суттєво менше (0.04% проти 0.4%), що свідчить про більш спокійний та аперіодичний характер перехідного процесу в каскадній системі. Ці результати підтверджують теоретичні припущення про ефективність каскадного керування для інерційних об'єктів.

4.5 Рекомендації щодо технічної реалізації вдосконаленої системи керування ПВТ на сучасній елементній базі

Технічна реалізація вдосконаленої системи автоматичного керування ПВТ,

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

зокрема каскадної АСР, вимагає ретельного підходу до вибору сучасної елементної бази, включаючи програмовані логічні контролери, SCADA/HMI системи, датчики та виконавчі механізми, а також забезпечення їх належної інтеграції. Успішна модернізація є не просто набором окремих компонентів, а створенням інтегрованої системи, ефективність якої залежить від правильного вибору всіх елементів, їх узгодження та налаштування комунікацій. Помилки на будь-якому етапі можуть нівелювати переваги сучасного обладнання.

4.5.1 Критерії вибору та огляд сучасних програмованих логічних контролерів (ПЛК) та SCADA/HMI систем для задач керування ПВТ

Програмовані логічні контролери (ПЛК) є ядром сучасної системи автоматизації. При виборі ПЛК для керування ПВТ слід враховувати наступні критерії:

- Продуктивність та обсяг пам'яті: ПЛК повинен мати достатню обчислювальну потужність для реалізації алгоритмів ПІД-регулювання (для двох контурів у каскадній системі), логічних блокувань, захистів та обробки сигналів від датчиків. Обсяг пам'яті має бути достатнім для зберігання програми керування та тимчасових даних.
- Кількість та типи вводів/виводів (I/O): Необхідно забезпечити достатню кількість аналогових входів (для датчиків температури, тиску, рівня, витрати), дискретних входів (для сигналів положення засувки, спрацювання захистів), аналогових виходів (для керування виконавчими механізмами) та дискретних виходів (для керування засувками, сигналізації). Модульна конструкція ПЛК дозволяє гнучко нарощувати кількість I/O модулів.
- Підтримка промислових протоколів зв'язку: ПЛК повинен підтримувати стандартні промислові протоколи (наприклад, Modbus RTU/TCP, Profibus DP/PA, Ethernet/IP, PROFINET) для обміну даними з датчиками, виконавчими механізмами, SCADA/HMI системами та іншими пристроями АСУ ТП.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- **Наявність функціональних блоків:** Сучасні ПЛК часто мають вбудовані бібліотеки функціональних блоків для реалізації ПІД-алгоритмів, каскадного керування, математичних операцій, що спрощує програмування.

- **Можливості резервування та діагностики:** Для підвищення надійності критично важливих систем керування можуть використовуватися резервовані ПЛК (з резервуванням процесора, живлення, модулів I/O). Важлива також наявність розвинених засобів самодіагностики ПЛК. Провідними виробниками ПЛК є Siemens (SIMATIC S7), Rockwell Automation (Allen-Bradley ControlLogix, CompactLogix), Schneider Electric (Modicon), Mitsubishi Electric (MELSEC) та інші. ПЛК, як зазначено в , добре підходять для невеликих установок або окремих вузлів обладнання в межах більшого підприємства, забезпечуючи високу надійність та відносну легкість програмування.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) / HMI (Human-Machine Interface) системи забезпечують візуалізацію технологічного процесу, взаємодію оператора з системою керування, збір та архівування даних. Вимоги до SCADA/HMI систем для ПБТ:

- **Графічний інтерфейс:** Інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс з мнемосхемами ПБТ та системи регенерації, що відображають поточні значення параметрів, стан обладнання, положення регулюючих органів.

- **Візуалізація трендів:** Можливість побудови графіків зміни параметрів у часі (трендів) для аналізу динаміки процесів та ефективності регулювання.

- **Система тривог та повідомлень:** Ефективна система сповіщення оператора про відхилення параметрів від норми, спрацювання захистів, аварійні ситуації.

- **Збір та архівування даних:** Зберігання історії зміни технологічних параметрів та дій оператора для подальшого аналізу, діагностики та формування звітів.

- **Інтеграція з ПЛК:** Надійний зв'язок з ПЛК по промислових мережах.

- **Розмежування доступу:** Забезпечення різних рівнів доступу для операторів, інженерів АСУ ТП, технологів. Прикладами популярних SCADA-

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систем є Siemens WinCC, Wonderware InTouch (AVEVA), GE Cimplicity, Ignition SCADA. В згадується HMI/SCADA-система WebStudio.

4.5.2 Обґрунтування вибору та рекомендації щодо застосування сучасних високоточних датчиків та надійних виконавчих механізмів

Датчики: Вибір сучасних високоточних та надійних датчиків температури, тиску, рівня та витрати є критично важливим для забезпечення якості керування. Детальний огляд таких датчиків було наведено в Розділі 1.6.1 та Таблиці 1.5. При їх виборі для конкретної системи необхідно враховувати діапазони вимірювань, умови експлуатації (температура, тиск середовища), вимоги до точності та швидкодії, а також можливість інтеграції з ПЛК через відповідні інтерфейси (стандартні аналогові сигнали 4-20 мА з HART-протоколом або повністю цифрові польові шини Fieldbus).

Виконавчі механізми: Основними виконавчими механізмами в системі керування ПВТ є регулюючі клапани, що встановлюються на лініях подачі гріючої пари та зливу конденсату. До них висуваються наступні вимоги:

- Тип клапана: Для регулювання витрати пари та води в умовах високих тисків та температур часто використовуються сідельні клапани (одно- або двосідельні), кульові сегментні клапани або спеціальні клапани для важких умов експлуатації.
- Матеріали: Матеріали корпусу та внутрішніх деталей клапана повинні бути стійкими до корозії та ерозії під дією високотемпературної пари та води (наприклад, вуглецеві, леговані або нержавіючі сталі).
- Пропускна здатність (K_v або C_v): Клапан повинен мати достатню пропускну здатність для забезпечення максимальної необхідної витрати середовища при допустимому перепаді тиску.
- Діапазон регулювання (turndown ratio): Здатність клапана точно регулювати витрату в широкому діапазоні від мінімального до максимального значення.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

- Герметичність у закритому стані: Важливо для запобігання витокам та втратам енергії.
- Привід: Для керування регулюючими клапанами можуть використовуватися електричні або пневматичні приводи. Електричні приводи стають все більш популярними завдяки точності позиціонування, відсутності потреби в стисненому повітрі та можливості прямого підключення до ПЛК. Пневматичні приводи з мембранними або поршневими механізмами також широко використовуються, особливо якщо потрібна висока швидкість спрацьовування або функція безпечного положення при відмові живлення.
- Інтелектуальні позиціонери: Сучасні регулюючі клапани часто оснащуються інтелектуальними (smart) позиціонерами. Вони забезпечують високоточне позиціонування штока клапана відповідно до керуючого сигналу від ПЛК, автоматичне налаштування (калібрування), діагностику стану клапана та привода (наприклад, виявлення заїдання, зносу ущільнень), а також обмін даними з системою керування по цифрових протоколах (HART, Profibus PA, Foundation Fieldbus). Це дозволяє покращити якість регулювання, спростити обслуговування та перейти до предиктивної діагностики стану арматури. У наведені приклади моторизованих регулюючих клапанів живильної води з актуаторами, що приймають сигнали 4-20 мА або 0-10 В.

4.5.3 Аспекти інтеграції компонентів системи, вибір промислових мереж та протоколів обміну даними

Ефективна робота сучасної АСК для ПВТ залежить від належної інтеграції всіх її компонентів: датчиків, ПЛК, виконавчих механізмів, SCADA/HMI систем. Це передбачає вибір відповідної архітектури системи автоматизації (наприклад, розподілена система на базі кількох ПЛК, об'єднаних мережею, або більш централізована структура) та промислових мереж для обміну даними.

- Промислові мережі:
 - Польовий рівень (Fieldbus): Для зв'язку ПЛК з інтелектуальними датчиками та позиціонерами клапанів можуть використовуватися цифрові польові

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

шини, такі як Profibus PA, Foundation Fieldbus H1. Вони дозволяють передавати не тільки вимірне значення, але й діагностичну інформацію, а також здійснювати дистанційне налаштування пристроїв. Традиційним залишається використання аналогових сигналів 4-20 мА з накладеним HART-протоколом.

- Рівень керування (Control Level): Для зв'язку між ПЛК, модулями вводу/виводу, а також між ПЛК та SCADA/HMI системами широко використовуються мережі на основі Ethernet, такі як Ethernet/IP, Profinet, Modbus TCP/IP. Вони забезпечують високу швидкість передачі даних та гнучкість побудови системи. Для зв'язку з розподіленими модулями вводу/виводу або менш вимогливими пристроями можуть використовуватися такі мережі, як Profibus DP, Modbus RTU.

- Надійність та швидкодія передачі даних: Вибір мережевих технологій та їх топології повинен забезпечувати необхідну надійність (наприклад, шляхом резервування каналів зв'язку) та швидкодію передачі даних, особливо для сигналів, що використовуються в швидкодіючих контурах регулювання.

- Кібербезпека: Зростаюча складність систем автоматизації та їх підключення до корпоративних мереж або навіть Інтернету для віддаленого моніторингу та керування підвищують вимоги до кібербезпеки промислових систем керування. Несанкціонований доступ або кібератака можуть призвести до порушення роботи ПВТ, аварійних ситуацій або навіть зупинки енергоблоку. Тому при проектуванні та впровадженні сучасних АСК необхідно приділяти значну увагу питанням кібербезпеки: сегментації мереж, використанню промислових міжмережевих екранів (firewalls), організації контролю доступу, шифруванню даних, регулярному оновленню програмного забезпечення ПЛК та SCADA-систем.

Таблиця 4.1 - Порівняння методів налаштування ПІД-регуляторів для каскадних систем

<i>Метод налаштування</i>	<i>Короткий опис</i>	<i>Переваги</i>	<i>Недоліки</i>	<i>Складність реалізації</i>	<i>Необхідні дані/інструменти</i>
Послідовне налаштування (напр., ZN, TL)	Спочатку налаштовується внутрішній контур, потім зовнішній, розглядаючи внутрішній як еквівалентний об'єкт.	Відносна простота, використання відомих методів для одноконтурних систем.	Не завжди забезпечує глобальний оптимум для всієї каскадної системи. Якість залежить від точності налаштування кожного контуру.	Середня.	Модель або експериментальні дані для кожного контуру.
Метод одночасного налаштування в замкненому контурі	Параметри обох регуляторів визначаються одночасно на основі відгуку замкненої системи на зміну завдання, без потреби в явній моделі.	Не вимагає точної моделі процесу, може застосовуватися онлайн для переналаштування. Враховує взаємодію контурів.	Може бути складним для аналітичного виведення правил налаштування для конкретних об'єктів.	Висока (для розробки методу), середня (для застосування).	Експериментальні дані відгуку замкненої системи.
Оптимізаційні методи (генетичні алгоритми, ройовий інтелект тощо)	Пошук параметрів обох регуляторів шляхом мінімізації/максимізації цільової функції (інтегрального критерію якості) за допомогою ітераційних алгоритмів.	Дозволяють знайти глобально оптимальні налаштування для складних критеріїв якості. Можуть враховувати нелінійності.	Висока обчислювальна складність, вимагають моделі об'єкта для симуляції або тривалих експериментів на реальному об'єкті. Налаштування самого оптимізаційного алгоритму.	Висока.	Модель об'єкта (для симуляції) або можливість проведення експериментів, потужні обчислювальні засоби.
Методи на основі частотних характеристик (напр., метод релейного автоналаштування)	Визначення критичних параметрів системи (коефіцієнт підсилення, період коливач) в режимі автоколивач та розрахунок параметрів регуляторів за емпіричними формулами.	Можливість автоматичного налаштування без глибоких знань про об'єкт.	Не завжди застосовний для всіх типів об'єктів, може призводити до неоптимальних налаштувань.	Середня.	Можливість введення системи в режим автоколивач.

Таблиця 4.2 - Рекомендовані сучасні ПЛК, SCADA/HMI системи та виконавчі механізми для автоматизації ПВТ

Компонент	Ключові характеристики/Вимоги для ПВТ	Приклади виробників/серій	Орієнтовні переваги
ПЛК	Висока продуктивність, модульність, підтримка ПД та каскадного керування, промислові протоколи (Ethernet/IP, Profinet), резервування (опційно).	Siemens SIMATIC S7-1500/S7-400H, Rockwell Allen-Bradley ControlLogix/CompactLogix, Schneider Electric Modicon M580.	Надійність, гнучкість, широкі функціональні можливості, масштабованість.
SCADA/HMI	Інтуїтивний інтерфейс, мнемосхеми, тренди, система тривоги, архівування даних, інтеграція з ПЛК, розмежування доступу, звітність.	Siemens WinCC Unified/Professional, AVEVA System Platform (Wonderware), GE Digital iFIX/Cimplicity, Ignition SCADA.	Покращена візуалізація та контроль, ефективний аналіз даних, підтримка прийняття рішень.
Регулюючий клапан (пара, вода)	Сідельний або сегментний тип, матеріали стійкі до високих Р,Т (сталь 20К, леговані сталі), відповідна Kv, високий діапазон регулювання, герметичність.	Emerson Fisher, Samson, Flowserve, Metso (Neles).	Точне регулювання витрати, надійність в важких умовах, тривалий термін служби.
Інтелектуальний позиціонер	Висока точність позиціонування, автокалібрування, діагностика клапана/привода, підтримка HART, Profibus PA, Foundation Fieldbus.	Siemens SIPART PS2/PS100, Emerson Fisher FIELDVUE, Samson TROVIS, Flowserve Logix.	Покращення якості регулювання, зменшення витрат на обслуговування, предиктивна діагностика.

Висновки до розділу

У даному розділі було проведено детальний аналіз та синтез автоматизованих систем керування температурою живильної води для підігрівача високого тиску ПВТ-7. Розраховано оптимальні параметри налаштування ПД-регуляторів як для одноконтурної, так і для каскадної АСР, використовуючи передавальні функції об'єкта, отримані раніше. Обговорено сучасні методи налаштування ПД-регуляторів для каскадних систем, що дозволяють досягти вищої якості керування.

Комплексне дослідження стійкості обох розроблених систем за допомогою аналітичних критеріїв Гурвіца та Найквіста, а також з використанням програмних засобів моделювання, підтвердило їх стійкість при розрахованих параметрах регуляторів.

Порівняльна оцінка якості керування одноконтурної та каскадної АСР,

проведена на основі аналізу перехідних характеристик, отриманих шляхом моделювання в програмному пакеті MatLAB, однозначно продемонструвала переваги каскадної системи. Каскадна АСР забезпечує значно меншу тривалість перехідного процесу та суттєво менше перерегулювання, що свідчить про вищу швидкодію та кращу динамічну точність. Це підтверджує правильність теоретичних припущень, сформульованих у попередніх розділах, щодо доцільності застосування каскадного керування для інерційних об'єктів, якими є ПВТ.

Надано детальні рекомендації щодо технічної реалізації вдосконаленої системи керування ПВТ на сучасній елементній базі. Розглянуто критерії вибору та оглянуто сучасні програмовані логічні контролери (ПЛК), SCADA/HMI системи, високоточні датчики та надійні виконавчі механізми, зокрема регулюючі клапани з інтелектуальними позиціонерами. Обговорено аспекти інтеграції компонентів системи, вибору промислових мереж та протоколів обміну даними, а також наголошено на важливості забезпечення кібербезпеки промислових систем керування.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведене дослідження, що включало переробку та доповнення існуючих матеріалів з автоматизації підігрівачів високого тиску (ПВТ) енергоблоку 200 МВт, дозволило сформулювати низку ключових висновків та розробити практичні рекомендації, спрямовані на підвищення ефективності, надійності та безпеки експлуатації даного обладнання.

1. Підтверджено критичну роль ПВТ у тепловій схемі енергоблоку та їх значний вплив на загальну ефективність. Деталізовано характеристики робочих середовищ та конструктивні особливості ПВТ. Встановлено, що для ефективного керування ПВТ необхідний точний та надійний моніторинг ключових параметрів (температура, тиск, рівень, витрата). Сучасні інноваційні датчики з цифровими інтерфейсами та функціями самодіагностики є фундаментальною передумовою для впровадження передових систем автоматизації. Розрахунок теплового балансу залишається важливим інструментом для оцінки ефективності та діагностики стану ПВТ.

2. Проаналізовано розвиток систем керування ПВТ від ручного втручання до класичних ПД-регуляторів та АСУ ТП. Виявлено недоліки одноконтурних систем регулювання, пов'язані з інерційністю об'єкта. Обґрунтовано переваги каскадних АСК для покращення якості регулювання. Розглянуто значний потенціал новітніх інтелектуальних технологій, таких як модельно-прогнозуюче керування (MPC), системи на основі штучного інтелекту та машинного навчання (ШІ/МН), нечіткої логіки (Fuzzy Logic), нейро-ПД регулятори та концепції цифрових двійників (Digital Twins), для подальшого підвищення ефективності та автономності роботи ПВТ.

3. На основі експериментальних даних для ПВТ-7 отримано та валідовано передавальні функції по основному (температура живильної води) та допоміжному (витрата гріючої пари) каналах регулювання. Підтверджено задовільну точність моделей (похибка апроксимації $<2.5\%$), що дозволяє використовувати їх для синтезу систем керування. Наголошено на важливості

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точності моделі для ефективності сучасних модельно-орієнтованих підходів до керування.

4. Розраховано параметри ПД-регуляторів для одноконтурної та каскадної АСК. Дослідження стійкості підтвердило працездатність обох систем. Порівняльний аналіз якості керування за перехідними характеристиками однозначно продемонстрував переваги каскадної АСК (час регулювання 40с проти 100с для одноконтурної, перерегулювання 0.04% проти 0.4%). Розроблено детальні рекомендації щодо технічної реалізації вдосконаленої системи на базі сучасних ПЛК, SCADA/HMI систем, датчиків та виконавчих механізмів.

Запропоновані удосконалення системи автоматизації ПВТ, зокрема перехід до каскадної АСК, реалізованої на сучасній елементній базі та з використанням вдосконалених методів налаштування регуляторів, забезпечують значне покращення якості регулювання температури живильної води. Це проявляється у скороченні часу перехідних процесів, зменшенні перерегулювання та підвищенні точності підтримання заданих параметрів, що безпосередньо впливає на стабільність та економічність роботи всього енергоблоку. Інтеграція новітніх інтелектуальних технологій, хоча і не була предметом детального синтезу в даній роботі, має величезний потенціал для подальшого вдосконалення. MPC може забезпечити оптимальне керування з урахуванням обмежень та багатозв'язності. Ш/МН можуть використовуватися для адаптивної оптимізації, точного прогнозування та ранньої діагностики несправностей, що підвищує надійність та знижує експлуатаційні витрати. Цифрові двійники надають платформу для комплексного моніторингу, симуляції та оптимізації роботи ПВТ протягом усього життєвого циклу. Важливо розуміти, що успішна модернізація системи автоматизації ПВТ є не ізольованим технічним завданням, а частиною загальної стратегії підвищення конкурентоспроможності ТЕС. Вона безпосередньо впливає на економічні показники через зниження витрат палива, екологічну безпеку через зменшення викидів та надійність енергопостачання через зниження ризиків аварій.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Боднар Л. А. Котельні установки: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 185 с.
2. Степанов Д. В., Корженко Є. С., Боднар Л. А. Котельні установки промислових підприємств: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 120 с.
3. Драганов Б. Х., Бессараб О. С., Шелімова О. В. Теплотехніка: підручник. – 2-е вид., перероб. і доп. – Київ: Інкос, 2005. – 504 с.
4. Романенко М. О., Копич В. І. Математичне моделювання та оптимізація систем керування. – К.: Либідь, 2017. – 278 с.
5. Панасенко Г. Г. Інженерні методи розрахунку систем автоматичного керування. – Дніпро: ДНУ, 2015. – 221 с.
6. Крук О. І. Проектування систем автоматичного керування: навчальний посібник. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – 314 с.
7. Білик М. М. Технічні засоби автоматизації: навч. посіб. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 256 с.
8. Дьяків О. М., Головченко А. С. САПР систем автоматичного керування. – Київ: ВНТУ, 2020. – 240 с.

					БР.АКП-24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62