

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

БОЙКО Зеновій Вікторович

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ
ТУРБОАГРЕГАТУ ТЕС /AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE
OPERATION OF A TPP TURBINE UNIT

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота
здобувача першого (бакалаврського) рівня освіти

Виконав: студент групи АКІТ–42
Бойко З. В.

Науковий керівник:
к.т.н., доц. Васильків Н. М.

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
" ____ " _____ 2026 р.

Завідувач кафедри СКС
_____ А. І. Сегін

Тернопіль 2026

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:

зав. кафедри СКС

_____ А. І. Сергін
" ____ " _____ 2025р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Бойку Зеновію Вікторовичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Система автоматизованого управління роботою турбоагрегату ТЕС. /Automated control system for the operation of a TPP turbine unit.

керівник роботи к.т.н., доц. Васильків Н.М.

затверджено наказом по університету від « 1 » грудня 2025 р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Технічні характеристики роботи турбоагрегату ТЕС.
2. Особливості процесів пароутворення, природної циркуляції та впливу теплового навантаження на роботу котла.
3. Вимоги до системи автоматизованого управління роботою турбоагрегату ТЕС.

4. Основні питання, які потрібно розробити

1. Провести аналіз технологічного процесу роботи котлоагрегату БКЗ-75-39 ФБ та визначити основні параметри контролю й регулювання.
2. Проаналізувати динамічні властивості об'єкта регулювання та визначити його математичну модель.
3. Обґрунтувати вибір закону регулювання та визначити оптимальні параметри налаштування регулятора.
4. Розробити структуру системи автоматизованого контролю та регулювання із використанням сучасних технічних засобів автоматизації.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Загальна схема технологічного процесу роботи ТЕС.
2. Структурна схема котла та систем автоматичного регулювання різних параметрів.
3. Перехідна характеристика об'єкта на основі експериментальних даних та її апроксимація аперіодичною ланкою першого порядку.
- 4 Структурна схема системи контролю та регулювання котельнею.
5. Мнемосхема котельні із зображенням принципу роботи всіх котлоагрегатів та їх параметрів.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Васильків Н.М.		
2	Васильків Н.М.		
3	Васильків Н.М.		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічного процесу роботи ТЕС та конструкції і функціонування котла	01.12.2025 р. – 15.01.2026 р.	виконано
2	Синтез системи автоматичного регулювання та розрахунок параметрів регулятора	16.01. 2026 р.– 15.03.2026р.	виконано
3	Архітектура системи автоматизованого управління роботою турбоагрегату ТЕС та її технічне і програмне забезпечення	16.03.2026 р. – 30.04.2026 р.	виконано
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.05.2026 р. – 25.05.2026 р.	виконано

Студент

(підпис) Бойко З.В.

Керівник роботи

(підпис) к.т.н., доц. Васильків Н.М.

АНОТАЦІЯ

Бойко З. В. Система автоматизованого управління роботою турбоагрегату ТЕС. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійною програмою – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль. 2026.

У кваліфікаційній роботі спроектовано сучасну систему автоматичного контролю та регулювання котлоагрегату БКЗ-75-39 ФБ, яка забезпечує підвищення точності підтримання параметрів пари, покращення надійності та безпеки роботи обладнання, зниження питомих витрат палива та енергоресурсів. Також розроблено операторський інтерфейс, який дозволяє здійснювати візуальний контроль технологічного процесу, дистанційне керування виконавчими механізмами та архівування подій

ANNOTATION

Boyko Z. V. Automated control system for the operation of a TPP turbine unit. – Manuscript.

Research for obtaining a bachelor's degree in the specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies, educational and professional program - Automation and computer-integrated technologies. – Western Ukrainian National University, Ternopil. 2026.

In the qualification work, a modern automatic control and regulation system for the BKZ-75-39 FB boiler unit was designed, which provides increased accuracy of maintaining steam parameters, improved reliability and safety of equipment operation, as well as reduced specific fuel and energy consumption. An operator interface was also developed, which allows for visual control of the technological process, remote control of actuators and archiving of events.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РОБОТИ ТЕС ТА КОНСТРУКЦІЇ І ФУНКЦІОНУВАННЯ КОТЛА.....	9
1.1 Опис технологічного процесу роботи ТЕС.....	9
1.2. Постановка задачі регулювання параметрів технологічного процесу.....	16
2 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА.....	27
2.1 Параметричний синтез системи автоматичного регулювання.....	27
2.2 Вибір закону регулювання.....	20
2.3 Вибір регулятора для системи регулювання тиску пари в барабані котла.....	22
2.4 Табличний спосіб розрахунку параметрів налаштування регулятора	25
2.5 Визначення параметрів налаштування методом розширених АФЧХ	26
3 АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ТУРБОАГРЕГАТУ ТЕС ТА ЇЇ ТЕХНІЧНЕ І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	31
3.1 Аналіз діючих на ТЕС систем автоматизації та їх технічного оснащення.....	31
3.2. Обґрунтування вибору сучасного технічного забезпечення САР.....	37
3.2.1 Вибір промислового комп'ютера.....	37
3.2.2 Вибір датчиків.....	41
3.2.3 Вибір модулів контролера серії ADAM-4000.....	46

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Бойко З.В.			Система автоматизованого управління роботою турбоагрегату ТЕС		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Васильків Н.М.						5	62
Консульт.		Васильків Н.М.					ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-42		
Н. Контр.		Заставний О.М.							
Затверд.		Сегін А.І.							

3.2.4 Обрані технічні засоби та їх роль у структурі системи автоматичного контролю та регулювання котлом ТЕС.....	49
3.3 Розробка операторського інтерфейсу.....	52
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60
ДОДАТОК А.....	63

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна теплоенергетика висуває підвищені вимоги до ефективності, надійності та безпеки роботи енергетичного обладнання. Одним із ключових елементів теплоелектростанцій є котлоагрегати, від стабільної роботи яких залежить безперервність виробництва пари та загальна ефективність енергоблоку. Особливої актуальності набуває проблема автоматизації процесів контролю та регулювання технологічних параметрів барабанних котлів, оскільки вони є складними багатовимірними динамічними об'єктами з взаємопов'язаними тепловими, гідравлічними та аеродинамічними процесами [1-3].

На багатьох теплоелектростанціях досі експлуатуються морально застарілі аналогові засоби контролю та регулювання, що характеризуються недостатньою точністю, обмеженими функціональними можливостями та низьким рівнем інформаційної підтримки оператора. У зв'язку з цим актуальним є впровадження сучасних комп'ютеризованих систем автоматичного контролю та регулювання на базі цифрових регуляторів, промислових комп'ютерів та модулів віддаленого введення-виведення.

Розроблення системи автоматичного контролю та регулювання котлоагрегату типу БКЗ-75-39 ФБ із використанням сучасних технічних засобів та алгоритмів цифрового ПІ-регулювання дозволяє підвищити точність підтримання технологічних параметрів, покращити енергоефективність роботи котла, знизити витрати палива та підвищити безпеку експлуатації обладнання [4].

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення системи автоматичного контролю та регулювання технологічних параметрів котлоагрегату БКЗ-75-39 ФБ на теплоелектростанції із застосуванням сучасних цифрових засобів автоматизації та контролю якості роботи системи регулювання тиску пари в барабані котла.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1. Провести аналіз технологічного процесу роботи котлоагрегату БКЗ-75-39 ФБ та визначити основні параметри контролю й регулювання.
2. Дослідити особливості процесів пароутворення, природної циркуляції та впливу теплового навантаження на роботу котла.
3. Проаналізувати динамічні властивості об'єкта регулювання та визначити його математичну модель методом апроксимації кривої розгону.
4. Виконати параметричний синтез системи автоматичного регулювання тиску пари в барабані котла.
5. Обґрунтувати вибір закону регулювання та визначити оптимальні параметри налаштування регулятора.
6. Оцінити якість перехідних процесів системи автоматичного регулювання за основними показниками якості.
7. Розробити структуру системи автоматизованого контролю та регулювання із використанням сучасних технічних засобів автоматизації.
8. Виконати вибір промислового комп'ютера, датчиків та модулів введення-виведення для реалізації системи.
9. Розробити операторський інтерфейс у вигляді мнемосхем для контролю та дистанційного керування технологічним процесом.
10. Оцінити практичну ефективність впровадження розробленої системи автоматизації.

Об'єктом дослідження є технологічний процес вироблення пари в барабанному котлоагрегаті типу БКЗ-75-39 ФБ теплоелектростанції.

Предметом дослідження є система автоматичного контролю та регулювання технологічних параметрів котлоагрегату, зокрема система регулювання тиску пари в барабані котла із використанням цифрового ПП-регулятора та сучасних технічних засобів автоматизації.

Методи дослідження. У роботі використано методи теорії автоматичного керування, математичного моделювання та аналізу динамічних систем. Для визначення параметрів об'єкта застосовано метод апроксимації кривої розгону. Параметри регулятора визначалися табличним

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

методом та методом розширених амплітудно-фазових характеристик. Якість роботи системи оцінювалася за показниками перерегулювання, часу перехідного процесу, ступеня затухання та кількості коливань. Для розроблення структури системи використовувалися методи функціонального та структурного синтезу автоматизованих систем керування.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні сучасної системи автоматичного контролю та регулювання котлоагрегату БКЗ-75-39 ФБ, яка забезпечує підвищення точності підтримання параметрів пари, покращення надійності та безпеки роботи обладнання, зниження питомих витрат палива та енергоресурсів, а також скорочення навантаження на обслуговуючий персонал.

Запропонована система базується на використанні промислового комп'ютера Schneider Electric Harmony Р6, модулів введення-виведення серії ADAM-4000 та сучасних цифрових засобів вимірювання технологічних параметрів. Розроблений операторський інтерфейс дозволяє здійснювати візуальний контроль технологічного процесу, дистанційне керування виконавчими механізмами та архівування подій, що забезпечує ефективну експлуатацію котельного обладнання в умовах реального енергетичного підприємства.

Апробація результатів роботи.

З. Бойко, В. Болехівський, О Шаповал. Система автоматизованого управління роботою турбоагрегату ТЕС.// Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026. С. 41-44.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РОБОТИ ТЕС ТА КОНСТРУКЦІЇ І ФУНКЦІОНУВАННЯ КОТЛА

1.1 Опис технологічного процесу роботи ТЕС

У опалювальних і опалювально-виробничих котельнях використовуються парові котельні агрегати. Котельня установка являє собою складний технологічний комплекс взаємопов'язаних машин і механізмів, що функціонують у єдиному виробничому потоці (рисунок 1.1). До її складу, окрім основного виробництва, можуть входити допоміжні підрозділи: водопідготовки, підготовки та транспортування палива, теплопостачання споживачів мережевою водою для потреб опалення та гарячого водопостачання.

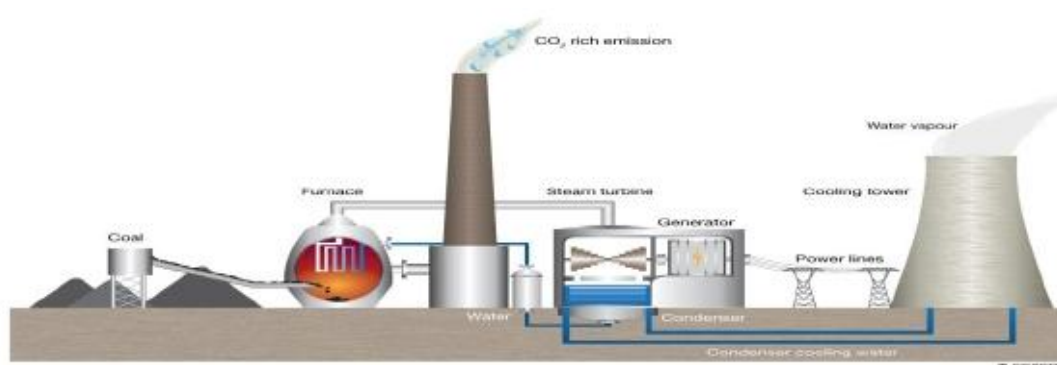


Рисунок 1.1 – Загальна схема технологічного процесу роботи ТЕС

Кожен із цих підрозділів оснащений агрегатами та двигунами, значна частина яких автоматизована, блокована між собою або інтегрована до загальної автоматизованої системи управління. Проте всі допоміжні установки підпорядковані єдиній меті — забезпеченню безперебійної роботи котлоагрегату і турбіни ТЕЦ або розподілу виробленої ними енергії між споживачами. Головним енергетичним агрегатом, що визначає економічність роботи теплової станції, залишається котельний агрегат, тому системі регулювання його теплового режиму приділяється особлива увага [5-7].

У кваліфікаційній роботі розглядається котельний агрегат типу БКЗ-75-

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

39 ФБ — вертикально-водотрубний, одnobарабанний, з камерною топкою, природною циркуляцією, трьома ступенями випаровування та П-подібним компонуванням поверхонь нагрівання. Паропродуктивність котла становить 75 т/год, тиск перегрітої пари — 39 кгс/см², температура перегрітої пари — 440°C. З метою продовження ресурсу металу паропроводів і пароперегрівачів номінальні параметри гострої пари за котлами знижені: температура — до 410±5°C, тиск — до 33±1 атм. Як паливо для котлоагрегату використовується буре вугілля та близькі до нього за складом і характеристиками види палива.

1.2 Конструкція та принцип роботи котла

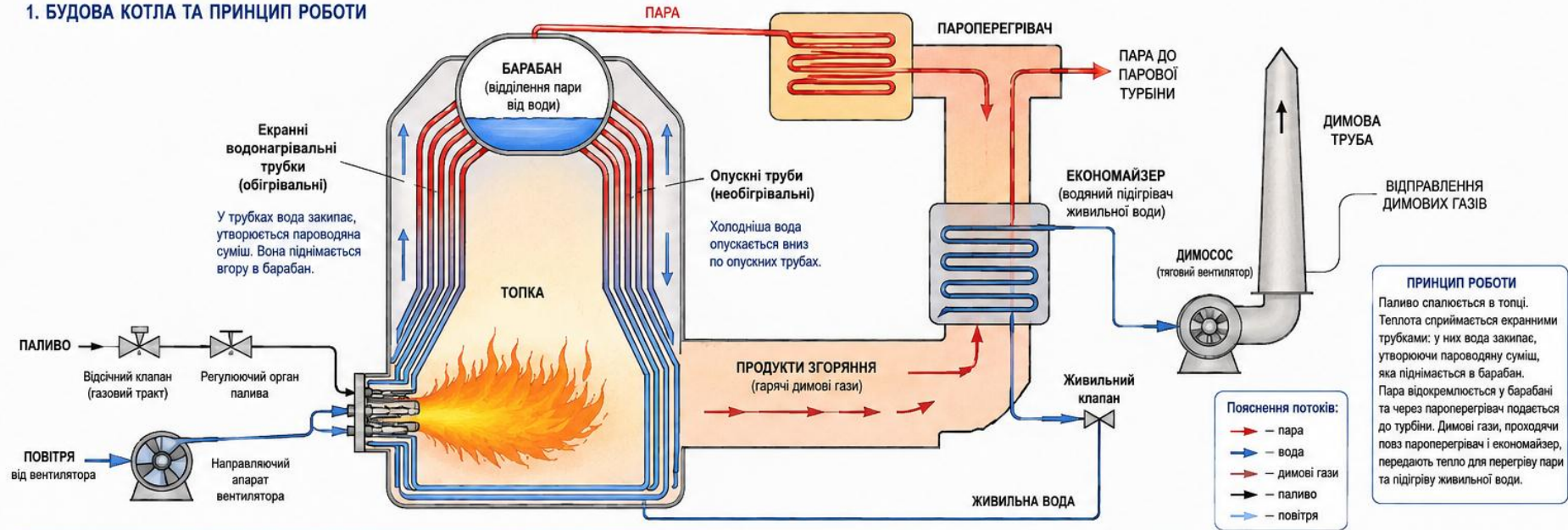
Паливо, що спалюється в топці, виділяє теплову енергію, яка поглинається активними поверхнями нагрівання котла — екранними водонагрівальними трубками [8-9]. Ці трубки, з'єднані з барабаном котла, охоплюють топковий простір і утворюють замкнений контур циркуляції води. Під дією тепла, яке передається від гарячих газів, вода в трубках закипає і перетворюється на пароводяну суміш. Оскільки щільність такої суміші менша за щільність чистої води, вона піднімається вгору по трубках і надходить у барабан котла, де пара відокремлюється від води і займає верхню частину барабана. Натомість по необігрівальних опускних трубах, з'єднаних із нижньою частиною обігрівальних труб, у контур надходить нова вода, і процес повторюється. Таким чином у котлі підтримується безперервна природна циркуляція.

Накопичена в барабані пара через пароперегрівач надходить до парової турбіни. Продукти згоряння палива відсмоктуються димососом, проходячи при цьому повз трубки пароперегрівача та водяного економайзера. Вторинне використання тепла димових газів підвищує коефіцієнт корисної дії установки: тепло витрачається на покращення енергетичних характеристик пари, а підігріта живильна вода, потрапляючи в барабан, не знижує температуру наявної там води. Поповнення втрат води, що відбирається разом із паром, здійснюється через живильний клапан (рисунок 1.2).

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

СТРУКТУРНА СХЕМА БУДОВИ КОТЛА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ

1. БУДОВА КОТЛА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ



2. СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ (ПРИНЦИПОВА СХЕМА)



Рисунок 1.2 – Структурна схема котла та систем автоматичного регулювання різних параметрів

Паливо подається в топку через відсічний клапан і регулюючий орган, а нормальний режим горіння забезпечується відповідною подачею повітря від вентилятора. Основним параметром, на якому базується регулювання подачі палива в індивідуальних котельних агрегатах, що працюють кожен на свою турбіну, є тиск пари в барабані котла. Якщо кількість спаленого палива точно відповідає потребі у виробленні пари для покриття її витрати, тиск у барабані залишається стабільним. Перевищення теплоподачі над тепловідбором спричиняє зростання тиску, а нестача — його падіння. Якщо вважати склад палива незмінним, що справедливо для газового та рідкого палива, то єдиною причиною зміни подачі палива є зміна обсягу відібраної пари. Саме тому процес регулювання подачі палива називається регулюванням навантаження котла, а відповідний пристрій — регулятором навантаження [10-11].

Регулятор отримує імпульс тиску з барабана і передає команду виконавчому механізму, який переміщує регулюючий орган палива. При цьому команда обробляється відповідно до закону регулювання з урахуванням інерційності процесу пароутворення: зміна подачі палива не одразу викликає зміну кількості виробленої пари, оскільки сам процес розгортається в часі, а частина тепла витрачається на прогрів топкових мас котла.

Для забезпечення повного згоряння палива в топку необхідно подавати певну кількість повітря. Надлишок повітря спричиняє підвищені втрати тепла з димовими газами і переохолодження топкового простору, а недостатня його подача призводить до неповного згоряння. На практиці в топку завжди подається невеликий нормований надлишок повітря, визначений коефіцієнтом надлишку повітря, встановленим під час теплових випробувань агрегату. Завдання автоматичного регулювання полягає в забезпеченні суворої відповідності подачі повітря цьому коефіцієнту. Якщо характеристика системи «паливо — регулюючий орган» є лінійною, сигнал

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

про кількість поданого палива знімається з датчика дистанційної передачі виконавчого механізму і надходить до регулятора надлишку повітря, який керує направляючим апаратом вентилятора.

Продукти згоряння мають бути повністю видалені з топки. Для запобігання їх виходу назовні в топці підтримується певне розрідження, яке контролюється у верхній частині топкової камери. Це пояснюється тим, що в нижній частині топки можливі різноманітні підсоси, тому при забезпеченні розрідження у верхній частині можна бути впевненим, що в інших зонах воно буде не меншим. Водночас надмірне розрідження призводить до підвищеного підсмоктування холодного повітря через нещільності в стінках котла, що збільшує швидкість димових газів, підвищує витрату електроенергії на привід димососа і в кінцевому підсумку знижує ККД котла. Сигнал розрідження передається на регулятор, який через виконавчий механізм повертає направляючий апарат димососа.

Регулювання рівня води в барабані котла здійснюється регулятором, який керує живильним клапаном: при зниженні рівня клапан відкривається, при підвищенні — прикривається. Однак, насправді рівень у барабані залежить від цілого ряду чинників: теплового навантаження топки, тиску пари в барабані, витрати пари та подачі живильної води.

У сталому тепловому режимі кількість утвореної пари відповідає її відбору споживачем, а вміст парових бульбашок в екранних трубках і об'єм пароводяної емульсії є незмінними. Будь-яке порушення цього стану змінює співвідношення між паром і водою в трубках. Зокрема, зростання теплового навантаження інтенсифікує пароутворення, збільшує кількість бульбашок і призводить до підвищення рівня в барабані. Своєю чергою, підвищення тиску в барабані спричиняє конденсацію частини бульбашок, що веде до зниження рівня.

Особливу роль відіграє ефект «набухання» — явище, що виникає при різкому зростанні навантаження. Збільшення споживання пари за незмінної

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

подачі палива знижує тиск у барабані, що викликає розширення пароводяної емульсії і стрімке зростання рівня. Це зростання регулятор сприймає як сигнал до зменшення подачі живильної води, що додатково підвищує температуру води й посилює «набухання». Проте надалі, із збільшенням витрати пари, рівень починає стійко знижуватися.

Щоб регулятор реагував не лише на сам рівень, а й на його причини, він повинен отримувати також сигнали витрати пари та живильної води. При цьому сигнал витрати пари подається до регулятора з протилежним знаком відносно сигналу рівня. Таке поєднання сигналів дозволяє уникнути як надмірного закриття живильного клапана під час «набухання», так і небезпечного падіння рівня в наступний період. Якщо живильний насос обслуговує кілька паралельно працюючих котлів, при відключенні одного з них тиск насоса зростає, що збільшує подачу води в решту котлів. Для компенсації цього ефекту до регулятора вводиться додатковий сигнал витрати живильної води.

Регулювання теплового режиму котла, що працює на турбіну, ускладнюється різною динамікою цих агрегатів: турбіна здатна змінювати споживання пари зі швидкістю, порівнянною з часом закриття регулюючих клапанів, тоді як зміна виробітку пари котлом відбувається значно повільніше. При різкому скиданні або наборі навантаження тиск пари в паропроводі перед турбіною може суттєво коливатися. Для захисту від різкого підвищення тиску застосовується швидкозмикаюча редуційно-охолоджувальна установка (БРОУ): коли тиск перевищує допустиму межу і регулятор навантаження не встигає стабілізувати режим, регулятор тиску відкриває клапан БРОУ і скидає надлишок пари в конденсат турбіни. Налаштування регулятора тиску зазвичай дещо перевищує налаштування регулятора навантаження, тому БРОУ підтримує тиск на дещо підвищеному рівні до моменту нормалізації режиму основним регулятором.

На тракті газового палива обов'язково встановлюється відсічний

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

клапан, призначений для перекриття подачі газу в разі згасання факела в топці. Як датчик згасання полум'я використовується фотоелемент або термопара. В робочому режимі струм через обмотки соленоїда утримує клапан у відкритому стані; при зникненні полум'я вихідний сигнал датчика зменшується і клапан автоматично закривається. При розпалюванні котла клапан відкривається вручну.

Таким чином, котел є складною динамічною системою з кількома взаємопов'язаними вхідними і вихідними величинами. Система управління барабанним котлом охоплює автономні підсистеми регулювання процесів горіння і пароутворення, температури перегрітої пари, живлення та водного режиму.

1.2 Постановка задачі регулювання параметрів технологічного процесу

Котлоагрегат є енергетичною установкою, в якій у процесі експлуатації з високою динамікою змінюються взаємопов'язані технологічні параметри. Впровадження автоматизації керування цими параметрами дає цілий ряд суттєвих переваг: скорочення чисельності обслуговуючого персоналу та підвищення продуктивності його праці, зміна характеру трудової діяльності у бік інтелектуальних функцій, підвищення точності підтримання заданих параметрів виробленої пари, посилення безпеки праці та надійності роботи обладнання, а також зростання економічності роботи парогенератора в цілому. Автоматичне регулювання забезпечує стабільне протікання безперервних процесів у парогенераторі — живлення водою, горіння, перегріву пари тощо.

Система [9-11] має забезпечувати оперативне відображення інформації про поточний стан кожного контролюваного параметра, його відхилення від оптимального заданого значення, а також саме це оптимальне значення.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Перелік контрольованих параметрів наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Перелік контрольованих параметрів

Найменування параметра	Необхідне значення
Температура перегрітого пара	440°C
Температура живильної води	104°
Рівень у барабані котла	315 мм
Тиск живильної води	6 кг/см ²
Тиск пари в барабані котла	44 кгс/см ²
Тиск перегрітої пари	39 кгс/см ²
Витрата поживної води	115 л/год
Витрата перегрітої пари	75 т/год

2 СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА

2.1 Параметричний синтез системи автоматичного регулювання

2.1.1 Апроксимація перехідної характеристики об'єкта аперіодичною ланкою першого порядку

Апроксимація перехідної характеристики об'єкта — це визначення передавальної функції (математичної моделі об'єкта) за кривою розгону [12].

За даними таблиці 2.1 побудовано експериментальну перехідну характеристику об'єкта (рисунок 2.1).

Таблиця 2.1 - Експериментальні дані значення тиску в різні моменти часу

t	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
P	0	0,8	2,0	4,0	6,8	10	13,5	17,4	21	24,5	27,7	30,5	33	35,5	37,5	39,0	40,5	41,6	42,5	43,3	43,8	44,0

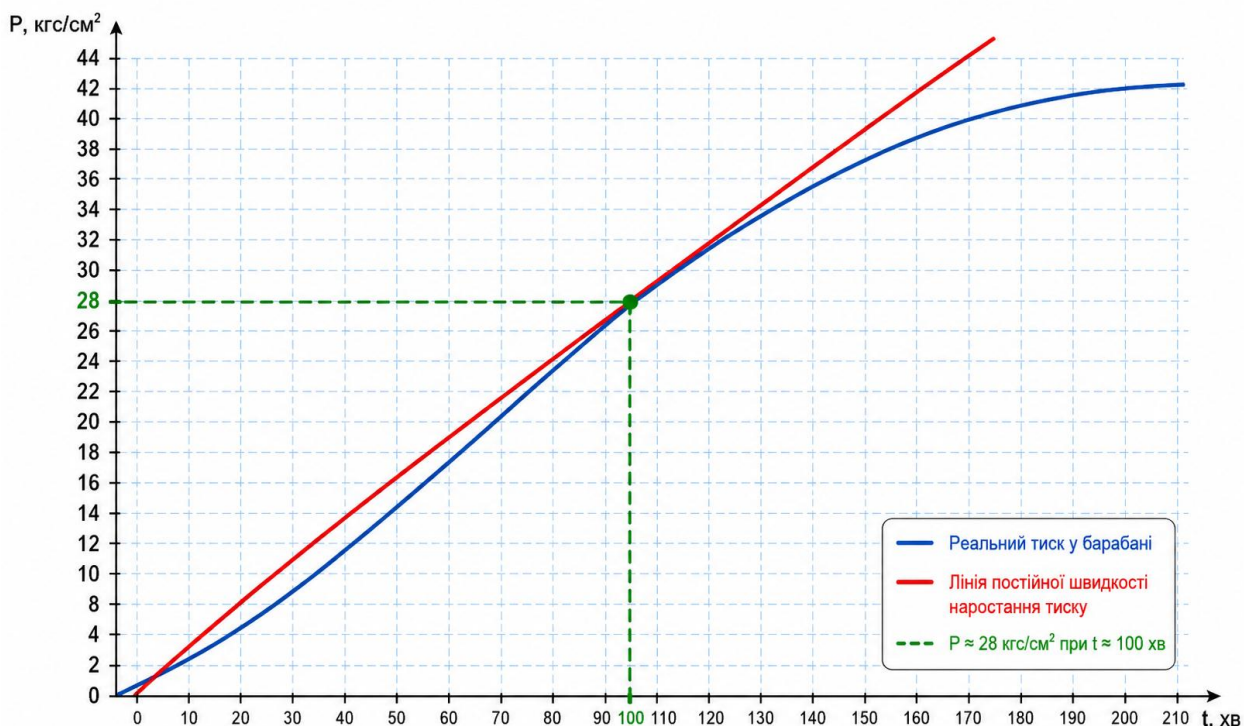


Рисунок 2.1 – Перехідна характеристика об'єкта на основі експериментальних даних та її апроксимація аперіодичною ланкою першого порядку

Порядок визначення параметрів передавальної функції [13-14]:

Крок 1. На кривій розгону визначається ділянка запізнення. Для цього до точки перегину перехідної характеристики проводиться дотична до перетину з віссю абсцис. Стала запізнення дорівнює відстані від початку координат до точки перетину дотичної з віссю абсцис: $\tau = 15 \text{ хв}$.

Крок 2. Визначається стала часу T . На осі ординат відкладається значення, що дорівнює $0,63t_{уст}$, і знаходиться відповідний момент часу t^* :

$$T = t^* - \tau, \quad (2.1)$$

де T — стала часу;
 τ — величина запізнення.

Провівши горизонталь до перетину з графіком і опустивши перпендикуляр на вісь абсцис, отримуємо $t^* = 100 \text{ хв}$:

$$T = 100 - 15 = 85 \text{ хв}.$$

Крок 3. Визначається коефіцієнт підсилення об'єкта:

$$K = \frac{Y_{уст}}{X_{ex}}, \quad (2.2)$$

де K — коефіцієнт підсилення об'єкта;
 $Y_{уст}$ — усталений тиск у барабані котла.

$$K = \frac{44}{1} = 44$$

Крок 4. Отримані значення підставляються у вихідну передавальну функцію першого порядку:

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$W(p) = \frac{44 \cdot e^{-15p}}{85p + 1} \quad (2.3)$$

Крок 5. Правильність визначення передавальної функції перевіряється за допомогою програмного середовища MATLAB [28]. Розрахункова перехідна характеристика накладається на експериментальну (рисунок 2.2), після чого визначається похибка апроксимації за формулою:

$$\delta = \frac{P_{\text{екс}}(t) - P_{\text{роз}}(t)}{P_{\text{уст}}(t)}. \quad (2.4)$$

Максимальне значення похибки склало: $\delta = 4,545\%$, що не перевищує допустимої норми у 5%. З аналізу таблиці та графіка видно, що розбіжність між розрахунковою і експериментальною характеристиками знаходиться в межах допустимого, що підтверджує придатність обраного методу апроксимації для даного об'єкта. Таким чином, передавальна функція об'єкта має вигляд:

$$W(p) = \frac{44 \cdot e^{-15p}}{85p + 1}.$$

2.2 Вибір закону регулювання

Вибір типу регулятора передбачає визначення найпростішого закону регулювання, що забезпечує при різних збуреннях допустимі значення динамічної похибки, часу регулювання та статичної похибки при мінімальній вартості та складності в експлуатації. Тип регулятора будь-якої автоматичної системи може бути визначений за трьома зазначеними показниками або за їх частиною [15-18].

При виборі закону регулювання враховують такі чинники: властивості об'єкта регулювання, максимально допустиму величину відхилення,

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

прийнятий для даного технологічного процесу вид типового перехідного процесу, а також допустимі значення показників якості регулювання — динамічної похибки y_{1don} , статичної похибки $y_{ст. don}$ та часу регулювання $t_{p. don}$.

Відповідно до технологічних вимог, як заданий, обирається один із типових перехідних процесів: аперіодичний, з 20%-м перерегулюванням або з мінімальною квадратичною площею відхилення. При цьому доцільно надавати перевагу регуляторам найпростіших типів.

Підбір регулятора [29-30] починається з визначення максимального динамічного відхилення регульованої величини у замкненому контурі. При цьому має виконуватися умова:

$$y_1 < y_{1don} \quad ,$$

де y_{1don} — максимально допустиме динамічне відхилення вихідної величини в системі регулювання.

Для стійких об'єктів величина y_1 визначається за виразом:

$$y_1 = R_0 \cdot k_0 \cdot x_e \quad , \quad (2.6)$$

де R_0 — динамічний коефіцієнт регулювання;

k_0 — коефіцієнт передачі об'єкта по каналу регулюючого впливу;

x_e — регулюючий вплив, що викликає таку саму зміну регульованої величини, як і максимальний збурюючий вплив z_{max} .

Орієнтовний характер дії регулятора визначається за відношенням τ / T_0 , а саме: при $\tau / T_0 \leq 0,2$ — позиційний регулятор; при $0,2 \leq \tau / T_0 \leq 1,0$ — регулятор безперервної дії; при $\tau / T_0 > 1,0$ — багатоконтурна система регулювання.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Перевірка починається з І-регулятора: за визначеним значенням R_0 обчислюється y_1 і порівнюється з допустимим. При виконанні умови І-регулятор перевіряється на час регулювання t_p . Якщо жодна з умов не виконується, послідовно розглядаються складніші закони регулювання. У разі вибору П-регулятора додатково перевіряється статична похибка:

$$y_{cm} \leq y_{cm.don}, \quad (2.7)$$

$$y_{cm} = y_{cm}^* \cdot k_0 \cdot x_{\epsilon}. \quad (2.8)$$

Якщо отримане значення перевищує допустиме, здійснюється перехід до регуляторів з інтегральною складовою — ПІ- або ПІД-регуляторів. Перевірка часу регулювання виконується за умовою:

$$t_p < t_{p.don} \quad .$$

2.3 Вибір регулятора для системи регулювання тиску пари в барабані котла

Для автоматизації системи регулювання тиску пари в барабані котла з перехідним процесом, що має 20%-е перерегулювання, об'єкт регулювання характеризується такими динамічними властивостями, що визначаються з (2.3):

$T_0 = 100$ хв — стала часу;

$\tau = 15$ хв — величина запізнення;

$k_0 = 44$ (на 1% ходу регулюючого органу) — передавальний коефіцієнт;

збурення $x_{\epsilon} = 5\%$ ходу регулюючого органу.

За результатами аналізу як закон регулювання обрано ПІ-закон

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

(пропорційно-інтегральний). У цьому законі переміщення регулюючого органу пропорційне сумі відхилення та інтегралу від відхилення регульованої величини:

$$X_p = -\left(C_0 \int X_{об} dt + C_1 X_{об}\right). \quad (2.9)$$

Швидкість регулювання пропорційна відхиленню та його похідній:

$$\dot{X} = C_0 X_{об} + C_1 \dot{X}_{об},$$

$$pX_p = (C_0 + C_1 p)X_{об},$$

$$W(p) = \frac{C_0}{p} + C_1,$$

де C_0 , C_1 — параметри налаштування регулятора.

При $C_1 = 0$ отримуємо І-закон регулювання з фазо-частотною характеристикою $\varphi = \pi / 2$; при $C_0 = 0$ — П-закон з $\varphi = \pi / 2$.

ПІ-регулятор належить до класу астатичних регуляторів і має два параметри налаштування [18-19]. Його принципова відмінність від пропорційного регулятора полягає в здатності повністю усувати статичну похибку та утримувати регульовану величину на заданому рівні в усталеному режимі. У момент виникнення відхилення поточного значення від заданого регулятор здійснює початкове переміщення виконавчого органу, величина якого пропорційна цьому відхиленню. Якщо після такого переміщення значення регульованої величини не повертається до заданого, інтегральна складова регулятора забезпечує подальше переміщення виконавчого органу аж до повного усунення розузгодження.

Завдяки інтегральній складовій, ПІ-регулятор здатний ефективно функціонувати в системах з об'єктами, що мають значне транспортне запізнення, — за умови, що коефіцієнт підсилення K_p обрано достатньо

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

малим. Слід зазначити, що виконання умови стійкості системи регулювання є лише необхідною, але не достатньою умовою для отримання бажаної якості перехідного процесу. Для досягнення необхідних показників якості регулювання потрібно додатково підібрати раціональне поєднання закону регулювання з відповідними параметрами налаштування з урахуванням характеру збурюючих впливів на об'єкт.

Таким чином, завдання налаштування регулятора зводиться до визначення таких значень параметрів, за яких перехідний процес у замкненій системі регулювання є найбільш близьким до оптимального з точки зору обраного критерію якості.

Амплітудно-фазова характеристика ПІ-регулятора визначається підстановкою оператора p на $j\omega$:

$$W(j\omega) = -\left(C_1 + j \frac{C_0}{\omega} \right), \quad (2.10)$$

або в показниковій формі:

$$W(j\omega) = \sqrt{\left(\frac{C_0}{\omega}\right)^2 + C_1^2} \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega C_1}{C_0}\right)}$$

$$A(\omega) = \sqrt{\left(\frac{C_0}{\omega}\right)^2 + C_1^2}, \quad (2.11)$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega C_1}{C_0}.$$

За кутом випередження ПІ-регулятор посідає проміжне місце між П- та І-регуляторами, оскільки $\pi/2 < \varphi(\omega) < \pi$.

ПІ-регулятор є астатичним із двома параметрами налаштування:

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$C_1 = K_p,$$

$$C_0 = \frac{K_p}{T_i},$$

де K_p — коефіцієнт підсилення;

T_i — час ізодрому.

У момент виникнення розузгодження $K_p = C_1$, а залежність переміщення регулюючого органу від часу описується виразом:

$$x_p(t) = K_p \left(1 + \frac{t}{T_i} \right). \quad (2.12)$$

При $t = T_i$ маємо $x_p(t) = 2K_p$.

Зростання K_p при розузгодженні збільшує глибину зворотного зв'язку в системі автоматичного регулювання, завдяки чому статична похибка зникає. ПІ-регулятор підтримує усталене значення регульованої величини: при відхиленні поточного значення від заданого він переміщує регулюючий орган на величину, пропорційну відхиленню, і продовжує це переміщення доти, поки відхилення не буде усунуто. При невеликих значеннях K_p такий регулятор здатний ефективно працювати з об'єктами, що мають значне запізнення.

Умова стійкості системи регулювання є необхідною, але недостатньою для отримання бажаного перехідного процесу. Необхідна якість регулювання досягається шляхом підбору оптимальної комбінації закону регулювання та параметрів налаштування, що забезпечують перехідний процес, близький до оптимального.

2.4 Табличний спосіб розрахунку параметрів налаштування регулятора

Для ПІ-регулятора при отриманому відношенні $\tau/T_0 = 0,2$ визначаємо параметри налаштування регулятора:

$$K_p \cdot \frac{\tau}{T_0} = 1,1 \cdot \frac{44 \cdot 15}{85} = 8,54 \text{ хв.},$$

де параметри налаштування складають:

$$K_p = C_1 = \frac{1}{\delta} = 0,138,$$

$$C_0 = \frac{K_p}{T_i} = 0,003.$$

За допомогою програмного середовища MATLAB [28] побудовано перехідний процес системи регулювання (рисунок 2.3).

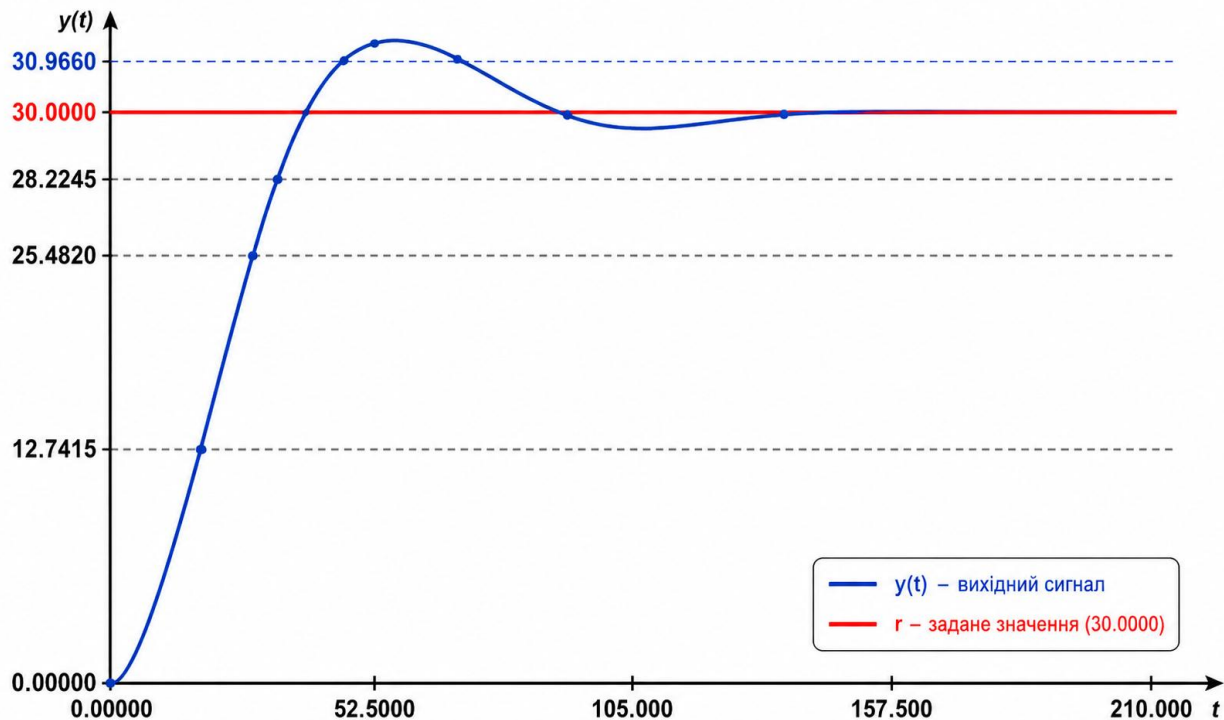


Рисунок 2.3 – Перехідний процес

2.5 Визначення параметрів налаштування методом розширених АФЧХ

Метод розширених амплітудно-фазових характеристик [20] базується на трьох основних принципах: використання ступеня затухання ψ як критерію якості перехідного процесу регулювання; визначення розширених амплітудно-фазових характеристик об'єкта і регулятора; застосування основної умови стійкості системи.

Ступінь затухання — це величина, що характеризує загасання перехідного процесу регулювання і чисельно дорівнює відношенню різниці двох сусідніх амплітуд коливань, спрямованих в одну сторону, до першої з них:

$$\psi = \frac{(h_{\max})_1 - (h_{\max})_2}{(h_{\max})_1}, \quad (2.13)$$

де $(h_{\max})_1$ та $(h_{\max})_2$ — амплітуди першого і другого напівперіодів найслабкозатухаючої складової відповідно.

У практичних розрахунках замість ступеня затухання використовують функціонально пов'язаний із ним показник — ступінь коливальності перехідного процесу m . Цей показник характеризує загасання коливальних складових процесу регулювання і чисельно дорівнює абсолютному значенню відношення дійсної частини до коефіцієнта при уявній частині кореня характеристичного рівняння з найменшим абсолютним значенням цього відношення.

Вихідною умовою розрахунку є співвідношення:

$$W_{об}(p) \cdot W_p(p) = 1.$$

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для системи регулювання, що розглядається в даному проєкті, раніше були отримані такі дані:

$$W(p) = \frac{44 \cdot e^{-15p}}{85p + 1},$$

$$W(p) = -\left(0,138 + \frac{0,003}{p}\right),$$

$$m = 6,$$

де $W_{об}(p)$ — передавальна функція об'єкта;

$W_p(p)$ — передавальна функція регулятора.

Виконавши заміну $p = \omega(j - m)$ у відповідних виразах, отримуємо розширені АФЧХ:

$$W_{об}(m, j\omega) = \frac{k \cdot e^{-m\tau}}{\sqrt{(1 + Tm)^2 + (T\omega)^2}} \cdot e^{-j\left(\omega\tau - \arctg \frac{T\omega}{T\omega + 1}\right)},$$

$$W_p(m, j\omega) = \frac{\sqrt{(C_0 + C_1m)^2 + (C_1\omega)^2}}{\omega} \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{C_1\omega}{C_0 + C_1\omega}\right)},$$

$$W_{ооб}(m, j\omega) = \frac{1}{W_p(m, j\omega)}.$$

Розв'язавши систему рівнянь відносно параметрів C_0 та C_1 , отримуємо:

$$C_0 = \frac{T(1 + m^2) - \pi m}{\tau} \cdot \frac{1}{k \cdot e^{m\tau} \cdot \sqrt{\left(\frac{\tau}{T}\right)^2 + m^2}}. \quad (2.14)$$

$$C_1 = \frac{T + \tau m}{k \cdot e^{m\tau} \cdot \sqrt{\left(\frac{\tau}{T}\right)^2 + m^2}}.$$

Підставляючи у вирази (2.14) значення частоти ω від 0 до значення, при якому C_0 стає від'ємним, будується залежність $C_0 = f(C_1)$ — лінія рівного ступеня згасання (рисунок 2.4).

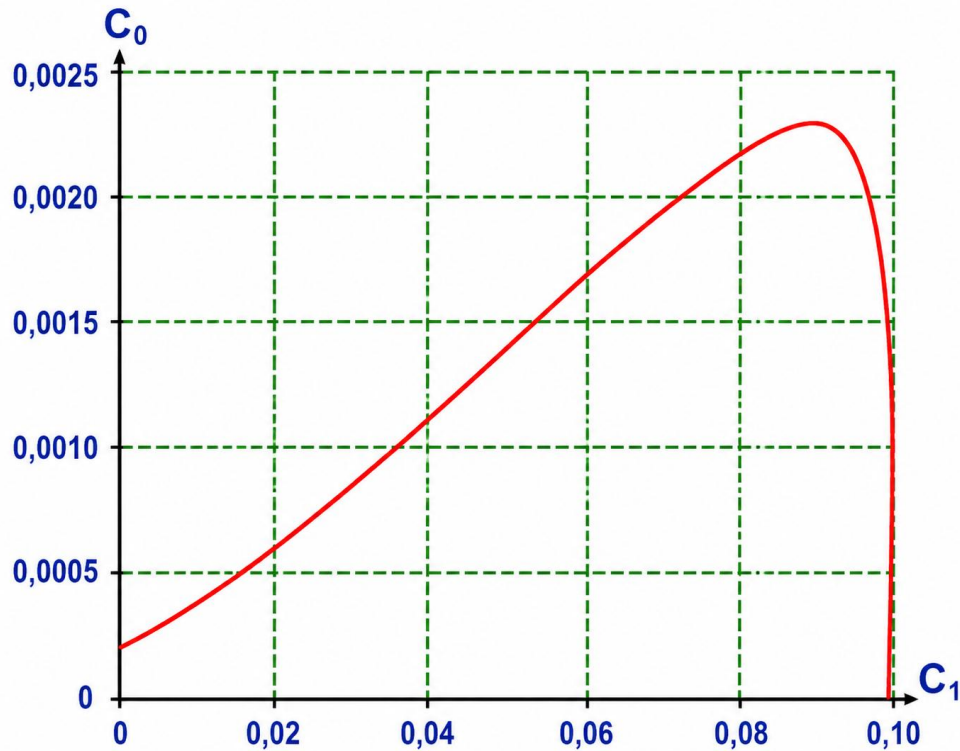


Рисунок 2.4 – Крива рівного ступеня згасання

За результатами графічного аналізу визначено оптимальні параметри налаштування:

$$C_1 = 0,0969, \quad C_0 = 0,0013,$$

$$K_p = C_1 = 0,0969, \quad T_i = \frac{K_p}{C_0} = 73,02 \text{ хв.}$$

Перехідна характеристика замкненої системи з оптимальними параметрами регулятора наведена на рисунку 2.5.

Оцінка якості перехідного процесу виконується за перехідною характеристикою із оптимальними параметрами регулятора: $K_p = 0,0969$, $T_i = 73,02$ хв.

Максимальне відхилення у перехідний період визначається як перерегулювання:

$$\sigma = \frac{X_{\max} - X_{\text{уст}}}{X_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{50,97 - 44}{44} = 15,8\%$$

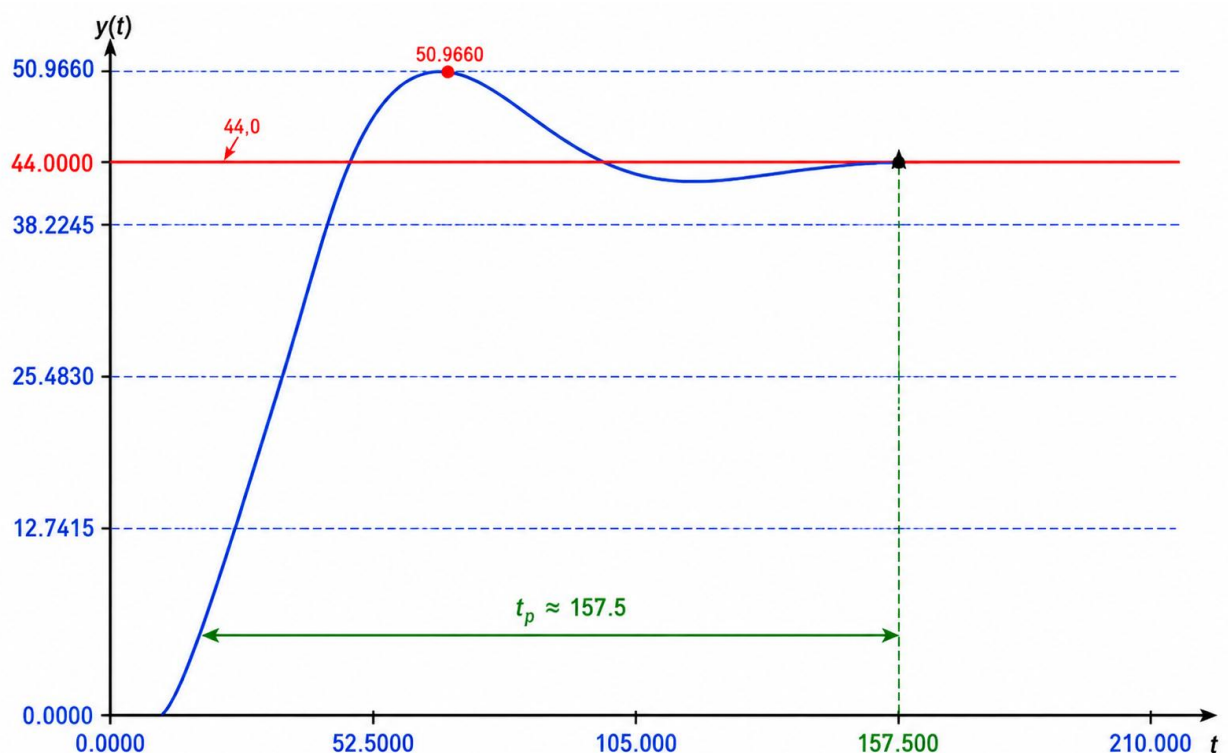


Рисунок 2.5 – Перехідна характеристика замкнутої системи

За результатами аналізу перехідного процесу визначено такі показники якості регулювання: час перехідного процесу — $t_p = 125$ хв; кількість коливань — $N = 1$; час наростання — $t_n = 41$ хв; час досягнення першого максимуму — $t_{\max} = 56$ хв; ступінь затухання — $\psi = 1$.

3 АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОЮ ТУРБОАГРЕГАТУ ТЕС ТА ЇЇ ТЕХНІЧНЕ І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Аналіз діючих на ТЕС систем автоматизації та їх технічного оснащення

3.1.1 Базові пристрої для регулювання параметрів

Головний регулятор отримує сигнали від датчика тиску перегрітої пари в магістралі (39 кгс/м^2) та від задавального пристрою. До регулятора теплового навантаження надходять сигнали від головного регулятора, датчика витрати пари (75 т/год), датчика тиску в барабані котла (39 кгс/м^2) та задавального пристрою. Регулятор подачі твердого палива отримує керуючий сигнал від регулятора теплового навантаження та задавального пристрою.

Регулятор подачі живильної води до котла функціонує на основі чотирьох вхідних сигналів: витрати перегрітої пари, витрати живильної води (75 т/год), рівня води в барабані котла ($\pm 315 \text{ мм}$) та сигналу від задавального пристрою. Регулятор температури перегрітої пари отримує інформацію від датчика температури перегрітої пари за головною паровою засувкою (440°C), датчиків температури перегрітої пари з правого і лівого боків котла, а також від задавального пристрою.

Вимірювання тиску живильної води, тиску насиченої пари в барабані котла та тиску перегрітої пари здійснюється перетворювачами тиску МЕД у комплекті з приладами типу КСД-2 (рисунок 3.1). Для вимірювання рівня води в барабані котла, витрати живильної води та перегрітої пари використовується мембранний диференціальний манометр ДМ-3583М у комплекті з приладом типу КСД-2. Усі технологічні процеси регулювання на котлі БКЗ-75-39 реалізуються за допомогою приладів типу Р-25.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

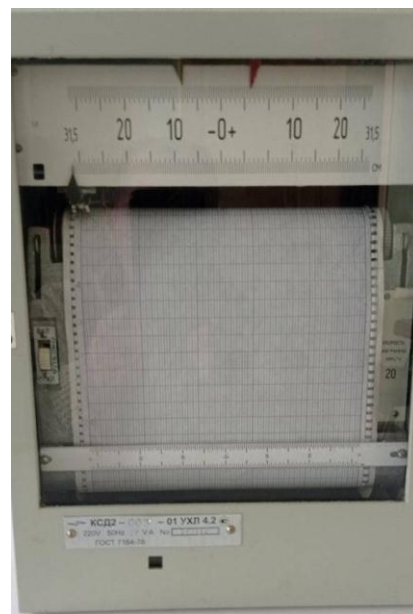


Рисунок 3.1 –Перетворювач тиску МЕД у комплекті з приладом типу КСД-2.

Регулюючий прилад типу Р-25 (рисунок 3.2) у поєднанні з виконавчим механізмом типу МЕО потужністю до 200 ВА або більше (у комплекті з пускачем будь-якого типу) реалізує ПІ-закон регулювання. Прилад призначений для застосування у схемах автоматичного регулювання та управління технологічними процесами в котельнях малої та середньої потужності.



Рисунок 3.2 – Регулюючий прилад типу Р-25

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Прилад виконує такі основні функції: підсумовування сигналів від вимірювальних перетворювачів з неуніфікованими електричними вихідними сигналами та коригуючих сигналів постійного струму або напруги, введення інформації про задане значення, формування та підсилення сигналу розузгодження; генерування на виході електричних імпульсів постійного або змінного струму для керування виконавчим механізмом з постійною швидкістю переміщення; формування спільно з виконавчим механізмом постійної швидкості пропорційно-інтегрального закону регулювання; формування спільно з диференціатором і виконавчим механізмом пропорційно-інтегрально-диференціального закону регулювання; ручне керування виконавчим механізмом; індикація положення виконавчого механізму та відхилення регульованого параметра від заданого значення.

Живлення приладу здійснюється від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В, частотою 50–60 Гц. Споживана потужність — до 25 ВА. Вхідний опір: для сигналу 0–5 мА — не більше 100 Ом; для 1–20 мА — 25 Ом; для 0–10 В — 15 Ом.

Основні вихідні параметри приладу: імпульси напруги пульсуючого постійного струму із середнім значенням 24 В (відхилення вихідного сигналу від заданої величини при навантаженні 115 Ом: в режимі автоматичного керування — не більше 10%, в режимі ручного керування — не більше мінус 10% та +20%); діапазон зміни сталої часу інтегрування $T_{\text{інт}}$ — від 5 с до 500 ± 200 с; діапазон зміни сталої часу демпфування $T_{\text{дф}}$ — від 0 до 10 с; діапазон зміни тривалості інтегральних імпульсів вихідного сигналу t_i — від 0,1 до 1 с.

Діапазон зміни сигналу коректора у відсотках від номінального діапазону вхідного сигналу: для Р25.1 (сигнал змінного струму частотою 50 Гц від 0 до 0,5 В) — від мінус 100 до +100%; для Р25.2 (активний опір термоперетворювача опору 46 Ом) — від мінус 50 до +50%; для Р25.3 (термо-ЕРС термоелектричного перетворювача від 0 до 50 мВ) — від 0 до

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

100 %. Діапазон зміни сигналу задавача: для Р25.1 — від мінус 20 до +20%; для Р25.2 — від мінус 7,5 до +7,5%; для Р25.3 — від 0 до 21%.

Безконтактні ключі приладу комутують змінний струм частотою 50–60 Гц та пульсуючий постійний струм з амплітудним значенням до 1 А при діючому значенні від 0,1 до 0,5 А. Навантаження, що підключається до внутрішнього джерела з напругою 24 В, є активно-індуктивним з активним опором від 100 до 240 Ом. Маса приладу — не більше 5 кг, середній термін служби — не менше 10 років. При цьому 90% приладів мають параметри, близькі до номінальних.

В усіх модифікаціях приладу застосовується субблок Р011, який виконує функції демпфування, гальванічного розділення, формування закону регулювання та комутації вихідних кіл. Два інших типи субблоків — Р012 та Р013 — є вимірювальними і забезпечують підсумовування сигналів від датчиків, введення сигналу завдання, перетворення сигналу датчика положення виконавчого механізму в сигнал постійного струму, а також формування стабілізованої постійної напруги живлення. В усіх модифікаціях приладу використовується єдиний трансформатор живлення.

Диференціальні мембранні манометри типу ДМ-3583М призначені для вимірювання тиску, витрати та рівня рідин і газів (рисунок 3.3). Вони являють собою стаціонарні вимірювальні перетворювачі перепаду тиску з уніфікованим вихідним сигналом змінного струму, що базується на зміні взаємної індуктивності.



Рисунок 3.3 – Диференціальні мембранні манометри типу ДМ-3583М

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Принцип роботи приладу ґрунтується на деформації пружного чутливого елемента під дією вимірюваного перепаду тиску. При виникненні перепаду тиску нижня мембранна коробка стискається, рідина з неї перетікає у верхню коробку, яка розширюється і спричиняє переміщення осердя диференціального трансформатора. Це переміщення, своєю чергою, змінює взаємну індуктивність між первинним і вторинним колами трансформатора. Деформація чутливого елемента триває доти, доки сили, зумовлені перепадом тиску, не врівноважуються пружними силами мембранних коробок.

Первинна обмотка диференціально-трансформаторного перетворювача живиться змінним струмом 125 мА з частотою 50 Гц. Вихідним сигналом є взаємна індуктивність між первинним і вторинним колами, що залежить від величини вимірюваного перепаду тиску. Клас точності приладу — 1,5 (основна похибка не перевищує 1,5%). Імовірність безвідмовної роботи за 2000 год становить: за метрологічними відмовами — не менше 0,92; за раптовими відмовами — не менше 0,94. Середній термін служби — 6 років.

Перетворювач тиску типу МЕД призначений для безперервного перетворення надлишкового або вакуумметричного тиску у вихідний сигнал змінного струму. Він застосовується у комплекті з вторинними взаємозамінними диференціально-трансформаторними приладами та регуляторами в системах контролю й управління різноманітними технологічними процесами. Як вимірювані середовища, допускаються рідини та гази без механічних включень, що не кристалізуються за температури, яка оточує прилад, і не є агресивними відносно мідних сплавів та вуглецевої сталі.

Принцип дії базується на врівноваженні вимірюваного тиску силою пружної деформації чутливого елемента — одновиткової трубчастої пружини, рухомий кінець якої через різьбовий шток з'єднаний із плунжером диференціального трансформатора. Переміщення рухомого кінця пружини,

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

пропорційне вимірюваному тиску, передається плунжеру і викликає зміну взаємної індуктивності від 0 до 10 мГн між первинною обмоткою та двома секціями вторинної обмотки трансформатора, ввімкненими зустрічно. Верхні межі вимірювання (модель 22365): 2,5; 4,0; 6,0; 10,0 МПа. Клас точності — 1 або 1,5. Діапазон робочих температур — від 5 до 50°C, відносна вологість — до 80%.

3.1.2 Вторинні показувальні самописні та регулюючі прилади з диференціально-трансформаторною вимірювальною схемою КСД-2

Прилади типу КСД-2 у комплекті з первинними перетворювачами призначені для вимірювання, реєстрації та регулювання витрати газу, рідини і пари, надлишкового тиску газу і повітря, рівня рідини та розрідження газу. Прилад перетворює вимірювану неелектричну величину у вихідний електричний параметр — комплексну взаємну індуктивність від 0 до 10 мГн. Залежно від комплектації вбудованими додатковими пристроями, прилади КСД-2 здатні здійснювати позиційне та пропорційне регулювання вимірюваного параметра, інтегрувати витрату рідини, газу чи пари у часі, а також забезпечувати дистанційну передачу інформації.

На підприємстві ТЕЦ-7 застосовуються прилади КСД-2 звичайного виконання УХЛ4.2

Живлення здійснюється від мережі змінного струму 220 В, 50 Гц. Основна похибка приладу не перевищує: $\pm 1,0\%$ — за показаннями, записом і передачею показань; $\pm 1,5\%$ — за сигналізацією та завданням на регулювання. Час проходження покажчика через всю шкалу — не більше 10 с. Номінальна швидкість переміщення діаграмної стрічки — від 20 до 2400 мм/год. Споживана потужність — 25 Вт (без інтегруючого пристрою) або 30 Вт (з інтегруючим пристроєм). Маса приладу — не більше 17,5 кг. Діапазон робочих температур — від 5 до 50°C, відносна вологість — від 30 до 80%.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Принцип роботи КСД-2 у комплекті з датчиком базується на порівнянні положень плунжерів двох диференціальних трансформаторів — датчика і приладу. Первинні обмотки обох котушок з'єднані послідовно і живляться від спеціальної обмотки силового трансформатора підсилювача напругою 24 В. Вторинні обмотки кожної котушки складаються з двох секцій, ввімкнених зустрічно, і з'єднані між собою за диференціальною схемою. При розузгоджених положеннях плунжерів на вхід напівпровідникового підсилювача подається сигнал розбалансу, який приводить у рух реверсивний двигун. Двигун через профільований кулачок переміщує плунжер у котушці приладу доти, доки різниця напруг не стає рівною нулю. Таким чином, кожному положенню осердя трансформатора первинного приладу, що визначається величиною вимірюваного параметра, відповідає певне положення осердя вторинного приладу і, відповідно, конкретне положення покажчика на шкалі.

3.2 Обґрунтування вибору сучасного технічного забезпечення САР

3.2.1 Вибір промислового комп'ютера

Промислові комп'ютери застосовуються практично в усіх галузях виробництва і суттєво відрізняються від офісних аналогів за своїми вимогами та конструктивними рішеннями. До них висуваються принципово інші вимоги: розвинені мережеві можливості, вібростійкість, ударостійкість, пилозахищеність та вологозахищеність, широкий діапазон робочих температур, компактні габарити для монтажу в стандартні стійки або вбудовування в технологічне обладнання, а в окремих випадках — іскро- та вибухобезпечність, стійкість до радіаційних і магнітних полів.

Для захисту від вібрації та ударів плати розміщуються на спеціальних амортизуючих підвісках і фіксуються захисними скобами в міцних корпусах.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Захист від пилу досягається створенням надлишкового тиску очищеного повітря всередині корпусу та встановленням змінних фільтрів на всмоктувальних вентиляторах. Характерною конструктивною особливістю промислових комп'ютерів є відсутність материнської плати в традиційному розумінні: процесорна плата встановлюється нарівні з периферійними платами у стандартні слоти пасивної кросплати, що дозволяє замінювати будь-який модуль за 5–10 хвилин. Для підвищення надійності застосовується сторожовий таймер, що автоматично перезапускає систему при зависанні програми, а параметри SETUP зберігаються в енергонезалежній пам'яті. Замість традиційного жорсткого диска може використовуватися твердотільний емулятор на базі флеш-ПЗП, що повністю імітує роботу вінчестера без механічних частин, забезпечуючи стійкість до вібраційних і ударних навантажень.

Для реалізації поставленого завдання обрано промисловий комп'ютер з панеллю Schneider Electric серії Harmony P6 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Промисловий комп'ютер Schneider Electric Harmony P6

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Промисловий комп'ютер із панеллю серії Harmony P6 [21] виробництва компанії Schneider Electric є сучасним рішенням класу «все-в-одному» для побудови людино-машинних інтерфейсів у відповідальних промислових застосуваннях, зокрема в системах управління котельним і турбінним обладнанням теплоелектростанцій. Пристрій поєднує в собі обчислювальну потужність промислового ПК та високоякісний сенсорний дисплей в єдиному захищеному корпусі, що суттєво спрощує інтеграцію в існуючу автоматизовану інфраструктуру підприємства.

Апаратна платформа пристрою базується на процесорі Intel Core i5 або i7 покоління Kaby Lake з тактовою частотою до 2,5 ГГц, що забезпечує достатню обчислювальну продуктивність для одночасного виконання завдань збору даних, візуалізації технологічних параметрів та управління виконавчими механізмами в режимі реального часу. Обсяг оперативної пам'яті типу DDR4 становить від 8 до 16 Гбайт залежно від конфігурації, що дозволяє без обмежень запускати сучасні SCADA-системи та промислові програмні пакети. Для зберігання операційної системи та прикладного програмного забезпечення використовується твердотільний накопичувач SSD місткістю від 64 до 256 Гбайт, виконаний у промисловому виконанні без рухомих частин, що гарантує стійкість до вібраційних і ударних навантажень, характерних для умов електростанцій.

Дисплей серії Harmony P6 виконано на основі матриці TFT з діагоналлю 15 або 19 дюймів із роздільною здатністю 1024×768 або 1280×1024 пікселів відповідно. Яскравість панелі становить не менше 400 кд/м², що забезпечує чітке зображення навіть в умовах яскравого бічного освітлення машинного залу. Сенсорний екран резистивного або ємнісного типу витримує роботу в рукавицях та за наявності бризок вологи на поверхні, що є важливою умовою для застосування в котельних відділеннях. Час відгуку сенсора не перевищує 10 мс, що забезпечує оперативну реакцію системи на дії оператора при управлінні технологічним процесом.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Ступінь захисту передньої панелі пристрою відповідає стандарту IP66 за класифікацією ІЕС 60529, що означає повний захист від проникнення пилу та стійкість до струменів води під тиском з будь-якого напрямку. Задня частина корпусу має ступінь захисту IP20. Металевий корпус виготовлений із листової сталі з порошковим покриттям і розрахований на монтаж у стандартні шафи або панелі управління методом врізання.

Масогабаритні показники залежать від варіанта дисплея: для 15-дюймової версії розміри монтажного вирізу становлять приблизно 375×295 мм при глибині встановлення близько 130 мм, маса пристрою не перевищує 7 кг.

Діапазон робочих температур навколишнього середовища складає від 0 до +55°C, температура зберігання — від мінус 20 до +70°C, відносна вологість допускається до 95% без конденсації вологи. Пристрій відповідає вимогам стійкості до вібрації за стандартом ІЕС 60068-2-6 та ударних навантажень за ІЕС 60068-2-27, що підтверджує придатність для застосування в умовах промислового виробництва з підвищеним рівнем механічних збурень.

Комунікаційні можливості пристрою охоплюють широкий спектр промислових інтерфейсів. Пристрій оснащено двома портами Ethernet 10/100/1000 Мбіт/с стандарту RJ-45 для підключення до промислової мережі та інтеграції з системами верхнього рівня, чотирма портами USB 3.0 для підключення периферійного обладнання, а також послідовними портами RS-232 та RS-485 для взаємодії з польовими пристроями, модулями введення-виведення та перетворювачами сигналів за протоколом Modbus RTU. Наявність слота розширення PCI Express дозволяє встановлювати додаткові комунікаційні або спеціалізовані плати для конкретних застосувань. Підтримка протоколів Modbus TCP/IP, EtherNet/IP та OPC UA забезпечує безперешкодну інтеграцію з контролерами Schneider Electric Modicon, іншими ПЛК та SCADA-системами рівня диспетчерського управління.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Живлення пристрою здійснюється від мережі змінного струму напругою 100–240 В із частотою 50–60 Гц або від джерела постійного струму напругою 24 В залежно від комплектації блока живлення. Споживана потужність у робочому режимі не перевищує 120 Вт, що є прийнятним показником для цілодобової безперервної роботи. Середнє напрацювання на відмову (MTBF) за розрахунковими даними виробника перевищує 50 000 годин, що відповідає більш ніж п'ятирічній безперервній експлуатації без технічного обслуговування.

Пристрій підтримує роботу під управлінням операційних систем Windows 10 IoT Enterprise та Windows 10 LTSC, а також сумісний із середовищем виконання EcoStruxure Operator Terminal Expert від Schneider Electric, яке забезпечує розробку і розгортання операторських інтерфейсів для управління технологічними процесами котельного та турбінного обладнання.

Відповідність міжнародним стандартам CE, UL, cUL та CSA підтверджує можливість застосування пристрою як на підприємствах Європи, так і в країнах з іншими системами технічного регулювання. Усі зазначені характеристики у сукупності роблять промисловий комп'ютер Schneider Electric Harmony P6 оптимальним рішенням для заміни застарілого обладнання на теплоелектростанціях, забезпечуючи необхідний рівень надійності, захищеності та функціональності сучасної системи автоматичного управління котлоагрегатом.

3.2.2 Вибір датчиків

Датчики тиску серії «Метран-22» (рисунок 3.5) призначені для застосування в системах автоматичного контролю, регулювання та управління технологічними процесами.

Вони забезпечують безперервне перетворення вимірюваного параметра — надлишкового тиску, абсолютного тиску, розрідження, тиску-розрідження

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

або різниці тисків нейтральних і агресивних середовищ — в уніфікований струмовий вихідний сигнал дистанційної передачі.

Модифікація «Метран-22-ДД» [23] може додатково використовуватися для перетворення значень рівня рідини, витрати рідини або газу в уніфікований струмовий сигнал.

Прилади сумісні з вторинною реєструючою та показувальною апаратурою, регуляторами, пристроями автоматики та системами управління, що працюють від стандартного вихідного сигналу 0–5 або 4–20 мА постійного струму.



Рисунок 3.5 – Датчики тиску серії «Метран-22-ДД»

За стійкістю до кліматичних впливів датчики відповідають виду кліматичного виконання УХЛ категорії і призначені для роботи в діапазоні температур від +5 до +50°C або від +1 до +80°C залежно від виконання.

Кожен перетворювач оснащений коректорами «нуля» і «діапазону», що дозволяють налаштувати вихідний сигнал відповідно до нижньої та верхньої меж вимірюваного параметра, і може бути налаштований на будь-яку верхню межу вимірювання, зазначену в паспорті (таблиця 3.1)

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 3.1 – Основні технічні параметри і характеристики датчиків тиску серії «Метран-22»

Тип датчика	Модель	Верхня межа вимірювань	Межа допустимої основної похибки, %
Метран-22-ДІ	2161	16 МПа	0,2; 0,25; 0,5
Метран-22-ДД	2410	1 кПа	0,25; 0,5
	2444	160 кПа	0,25; 0,5
	2444	250 кПа	0,25; 0,5

Електричне живлення датчиків здійснюється від джерел постійного струму напругою 36 В. Джерело живлення повинно мати опір ізоляції не менше 40 МОм і витримувати випробувальну напругу 1,5 кВ. Пульсація вихідної напруги не повинна перевищувати 0,5% від номінального значення при частоті гармонічних складових до 500 Гц. Навантажувальний опір: від 0,2 до 2,5 кОм — для перетворювачів із вихідним сигналом 0–5 мА; від 0,1 до 1,05 кОм — для перетворювачів із вихідним сигналом 4–20 мА при напрузі живлення 36 В. Споживана потужність при напрузі 36 В: не більше 0,5 Вт — для сигналу 0–5 мА; не більше 0,8 Вт — для сигналу 4–20 мА; не більше 1,2 Вт — для сигналу 0–20 мА.

Прилади призначені для роботи при атмосферному тиску від 84,0 до 106,7 кПа. Ступінь захисту від впливу води та пилу — IP65. За стійкістю до механічних впливів датчики відповідають вібростійкому виконанню: N4 (від 0,4 до 100 МПа), N3 (від 2,5 до 250 кПа), L3 (для датчиків з верхньою межею вимірювань менше 2,5 кПа). Допустимий напрямок вібрації — вздовж вертикальної осі датчика у робочому положенні. Середній термін служби — 12 років, середнє напрацювання на відмову — 100 000 годин, міжповірочний інтервал — 2 роки.

Датчик тиску складається з вимірювального блока (перетворювача тиску) та електронного перетворювача. При вимірюванні надлишкового, абсолютного тиску або тиску-розрідження тиск робочого середовища подається в камеру «+», тоді як камера «-» з'єднується з атмосферою. При

вимірюванні розрідження мембрана переміщується у бік, протилежний до надлишкового тиску. При вимірюванні різниці тисків позитивний і негативний тиски подаються у відповідні камери «+» і «-».

Тиск робочого середовища діє на мембрани, з'єднані між собою центральним штоком, який пов'язаний із важелем тензоперетворювача, і через рідину передається на мембрану тензоперетворювача. Чутливий елемент — пластина монокристалічного сапфіру з кремнієвими плівковими тензорезисторами (структура КНС), з'єднана з металевою мембраною тензоперетворювача. Тензорезистори ввімкнені в мостову схему. Деформація вимірювальної мембрани призводить до пропорційної зміни опору тензорезисторів і розбалансу мостової схеми. Електричний сигнал з виходу мостової схеми надходить до електронного блоку, де перетворюється в уніфікований струмовий сигнал.

Монтаж датчиків виконується відповідно до інструкції з експлуатації. З'єднувальні трубки від місця відбору тиску до датчика прокладаються по найкоротшому маршруту. Якщо температура робочого середовища перевищує допустиму температуру навколишнього повітря, датчик встановлюється на з'єднувальній лінії завдовжки від 0,5 до 15 м. Маса датчиків — від 1 до 10,4 кг залежно від моделі.

Термоперетворювач ТСПУ-205 (рисунок 3.6) призначений для перетворення температури рідких і газоподібних речовин в уніфікований струмовий вихідний сигнал і складаються з первинного перетворювача та вимірювального перетворювача. Як первинний перетворювач використовується термоперетворювач опору з НСХ-100П. Вимірювальний перетворювач являє собою друковану плату діаметром 43 мм, залиту з обох боків компаундом, на якій розміщені елементи електронної схеми. Вимірювальний перетворювач перетворює сигнал первинного перетворювача в уніфікований струмовий вихідний сигнал.

Основні технічні характеристики ТСПУ-205: діапазон вимірювання

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

температури — від 0 до 500°C; гранична основна зведена похибка — 0,5%; довжина занурної монтажної частини — 160 мм; граничний робочий надлишковий тиск — 25 МПа; вихідний уніфікований сигнал — від 4 до 20 мА; показник теплової інерції — не більше 10 с; маса — не більше 300 г. Схема підключення — двопровідна, опір навантаження кола — до 1000 Ом.



Рисунок 3.6 – Термоперетворювач ТСПУ-205

Модифікація ТСПУ-205Ех має особливо вибухобезпечний рівень вибухозахисту відповідно до стандарту, що забезпечується стандартним видом вибухозахисту «Іскробезпечний електричний ланцюг». Корпус головки виготовлений із термореактивної пластмаси АГ-4В, захисна арматура, що контактує з вимірюваним середовищем, — зі сталі 12Х18Н10Т. Діапазон вимірювання — від 0 до 200°C; гранична основна зведена похибка — 0,5%; довжина занурної монтажної частини — 500 мм; граничний робочий надлишковий тиск — 20 МПа; вихідний уніфікований сигнал — від 4 до 20 мА; показник теплової інерції — не більше 20 с; маса — не більше 570 г. Схема підключення — двопровідна, опір навантаження визначається

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

використовуваним іскробезпечним блоком живлення та бар'єром іскрозахисту.

Середній термін служби обох модифікацій — ТСПУ-205 та ТСПУ-205Ех — становить не менше 12 років.

3.2.3 Вибір модулів контролера серії ADAM-4000

Контролери серії ADAM-4000 [22] — модулі для розподілених систем збору даних та управління на базі інтерфейсу RS-485.

Останніми роками в промисловій автоматизації широкого поширення набули модулі для розподілених систем збору даних та управління серії ADAM-4XXX виробництва компанії Advantech (рисунок 3.7). Популярність цих пристроїв зумовлена їхньою універсальністю, широкою номенклатурою, що налічує понад десяток типів, можливістю побудови розподілених мереж збору даних на основі інтерфейсу RS-485, наявністю драйверів до поширених SCADA-систем та відносно доступною вартістю для проєктів з обмеженим бюджетом.



Рисунок 3.7 – Контролери серії ADAM-4000

Модулі серії ADAM-4000 являють собою компактні інтелектуальні пристрої обробки сигналів датчиків, спеціально розроблені для застосування в промисловому середовищі. Вбудовані мікропроцесори забезпечують нормалізацію сигналів, операції аналогового та дискретного введення-виведення, відображення даних та їх передачу або прийом по інтерфейсу RS-485. Усі модулі мають гальванічну розв'язку по колах живлення та інтерфейсу RS-485, програмне встановлення параметрів, командний протокол ASCII та сторожовий таймер. Живлення здійснюється нестабілізованою напругою 10–30 В постійного струму. Робочий діапазон температур — від мінус 10 до +70°C, температура зберігання — від мінус 25 до +80°C, відносна вологість — до 95% без конденсації вологи.

ADAM-4017. Модуль аналогового введення на 8 каналів (рисунок 3.8) оснащений 16-розрядним АЦП і має 6 диференціальних та 2 однополюсних канали. Передбачено програмне налаштування для роботи з сигналами мВ, В або мА. Гальванічна ізоляція становить 500 В.



Рисунок 3.8 – Модуль аналогового введення на 8 каналів ADAM-4017

Модуль аналогового введення для термометрів опору ADAM-4013 (рисунок 3.9) має 16-розрядний АЦП і підтримує програмне налаштування для роботи з термометрами опору типу Pt або Ni (RTD). Гальванічна ізоляція — 500 В. Підключення реалізується за двопровідною, трипровідною або чотирипровідною схемою.



Рисунок 3.9 – Модуль аналогового введення ADAM-4013

Модуль цифрового введення-виведення з гальванічною розв'язкою ADAM-4052 (рисунок 3.10). Він містить шість повністю ізольованих цифрових входів та два ізольованих входи зі спільним заземленням. Вхідна напруга — від 0 до 30 В, гальванічна ізоляція — 5000 В.



Рисунок 3.10 – Модуль цифрового введення-виведення з гальванічною розв'язкою

Модулі перетворювача RS-232 у RS-422/485 ADAM-4520/4510 та повторювача (рисунок 3.11). Швидкість передачі даних — до 38,4 кбіт/с. Передбачено автоматичний контроль напрямку передачі. Гальванічна ізоляція — 500 В (ADAM-4520), довжина сегмента лінії — до 1200 м, напруга живлення — 10–30 В. Модулі легко встановлюються на DIN-рейки.



Рисунок 3.11 – ADAM-4520/4510 модулі перетворювача RS-232 у RS-422/485

3.2.4 Обрані технічні засоби та їх роль у структурі системи автоматичного контролю та регулювання котлом ТЕС

За результатами проведеного аналізу для побудови автоматичної системи контролю та регулювання тиску пари в барабані котла було обрано такий комплект технічних засобів: промисловий комп'ютер Schneider Electric Harmony P6, термоперетворювачі ТСПУ-205 та ТСМУ-9313-3/1 у кількості 3 шт.; перетворювачі тиску Метран 22М-ДІ у кількості 4 шт.; перетворювачі тиску Метран 22М-ДД у кількості 5 шт.; модулі аналогового введення ADAM-4017 та ADAM-4013 у кількості 4 шт.; модулі дискретного виведення

ADAM-4052 у кількості 3 шт.; модулі перетворювача RS-232 у RS-422/485 та повторювача ADAM-4520/4510 у кількості 4 шт.

Інформація про поточні значення технологічних параметрів знімається з контрольованих об'єктів за допомогою термоперетворювачів ТСПУ-205, ТСМУ-9313-3/1 та перетворювачів тиску Метран 22М-ДІ і Метран 22М-ДД. Введення сигналів від датчиків до промислового комп'ютера Schneider Electric Harmony P6 здійснюється через модулі віддаленого введення серії ADAM-4000: ADAM-4017 — для струмових сигналів, ADAM-4013 — для термометрів опору, ADAM-4052 — для дискретних сигналів. Модулі перетворюють сигнали струму, напруги та термо-ЕРС у цифрові коди і передають дані до комп'ютера по інтерфейсу RS-485 за допомогою витой пари.

Вимірювання технологічних параметрів виконується у заданій послідовності та з регламентованою частотою: «швидкі» параметри, зокрема витрата та тиск, вводяться з інтервалом 1 с, «повільні» температурні параметри — з інтервалом 3 с. Вихідні сигнали модулів ADAM по інтерфейсу RS-485 надходять до модуля ADAM-4520, який перетворює їх у сигнали інтерфейсу RS-232 для стикування з комп'ютером.

Відображення інформації на екрані дисплея організоване у вигляді мнемосхем, що створюються за допомогою спеціального графічного редактора. Кожна мнемосхема є умовним графічним зображенням технологічної схеми певної функціональної групи, якій відповідає свій технологічний вузол. Будь-який об'єкт інформації або управління відображається принаймні в одній мнемосхемі і може бути викликаний у мале інформаційне вікно для отримання детальніших відомостей. У протоколі подій фіксуються всі зміни дискретних параметрів і модулів управління за останні 12 годин з можливістю рядкового або посторінкового перегляду (рисунки 3.12).

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ КОТЕЛЬНОЇ

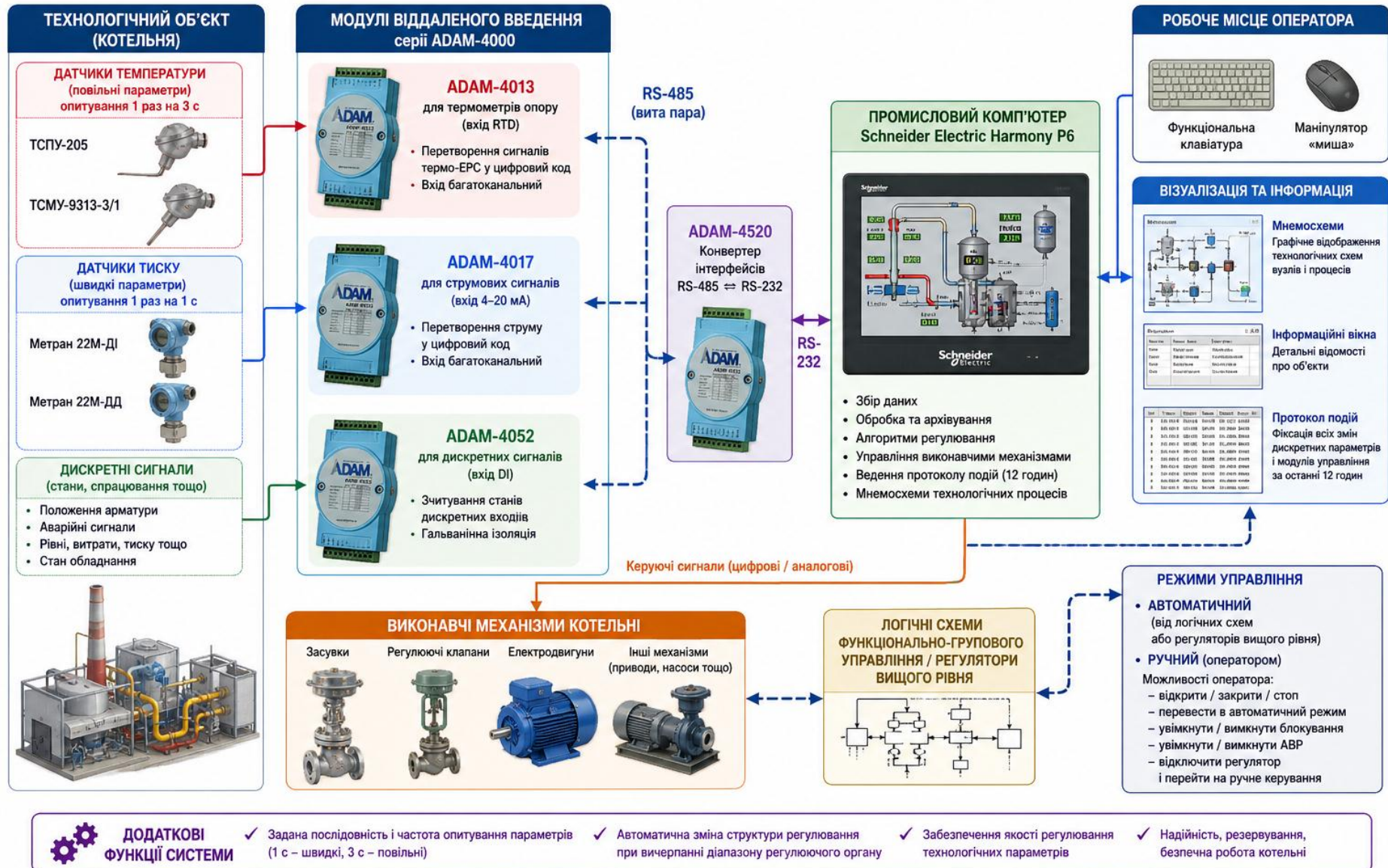


Рисунок 3.12 – Структурна схема системи контролю та регулювання котельною

Дистанційне управління об'єктом здійснюється з функціональної клавіатури або маніпулятором «миша» при наявності зображення відповідного об'єкта у вікні управління на дисплеї. Об'єктами дистанційного управління є виконавчі механізми котельні: засувки, регулюючі клапани, двигуни тощо. Крім подачі команд «відкрити», «закрити», «стоп», оператор має можливість переводити арматуру в режим автоматичного управління від логічних схем функціонально-групового управління або регуляторів вищого рівня, вмикати та вимикати блокування і схеми автоматичного введення резерву, а також відключати регулятор і переходити на ручне управління. У разі вичерпання регульовального діапазону будь-якого регулюючого органу структура системи регулювання автоматично змінюється відповідно до закладеного алгоритму, забезпечуючи збереження якості регулювання технологічних параметрів.

3.3 Розробка операторського інтерфейсу

Операторський інтерфейс системи має відповідати таким вимогам: відображати максимально повну інформацію про перебіг технологічного процесу без інформаційного перевантаження оператора; бути інтуїтивно зрозумілим для персоналу будь-якого рівня підготовки; мати захист від несанкціонованого втручання; унеможливлювати виконання некоректних або випадкових помилкових дій оператора.

Для реалізації операторського інтерфейсу використано SCADA-систему TRACE MODE [24], яка забезпечує візуалізацію технологічних параметрів, архівування даних, обробку аварійних повідомлень та дистанційне керування обладнанням котельні. Усі графічні елементи інтерфейсу виконані у вигляді мнемосхем, що дозволяє оператору швидко оцінювати поточний стан технологічного процесу та оперативно реагувати на зміну режимів роботи обладнання.

					ДП.АКИТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Весь процес управління котлоагрегатом поділено на такі функціональні рівні [25]: мнемосхема котельні із зображенням принципу роботи всіх котлоагрегатів; екран регулювання температури та тиску; імітація аварійної ситуації. Усі елементи керування на екранах виконані у вигляді кнопок меню, натискання яких надає оператору можливість виконати відповідну операцію управління конкретним пристроєм у відповідному відсіку, що забезпечує зручність і наочність управління [26-27].

На головній мнемосхемі котельні (рисунок 3.13) відображено загальну структуру технологічного процесу, яка включає три котлоагрегати, трубопроводи, запірно-регулюючу арматуру, насосне обладнання та контури подачі теплоносія. Для кожного котла у режимі реального часу виводяться основні технологічні параметри: температура, тиск та витрата.

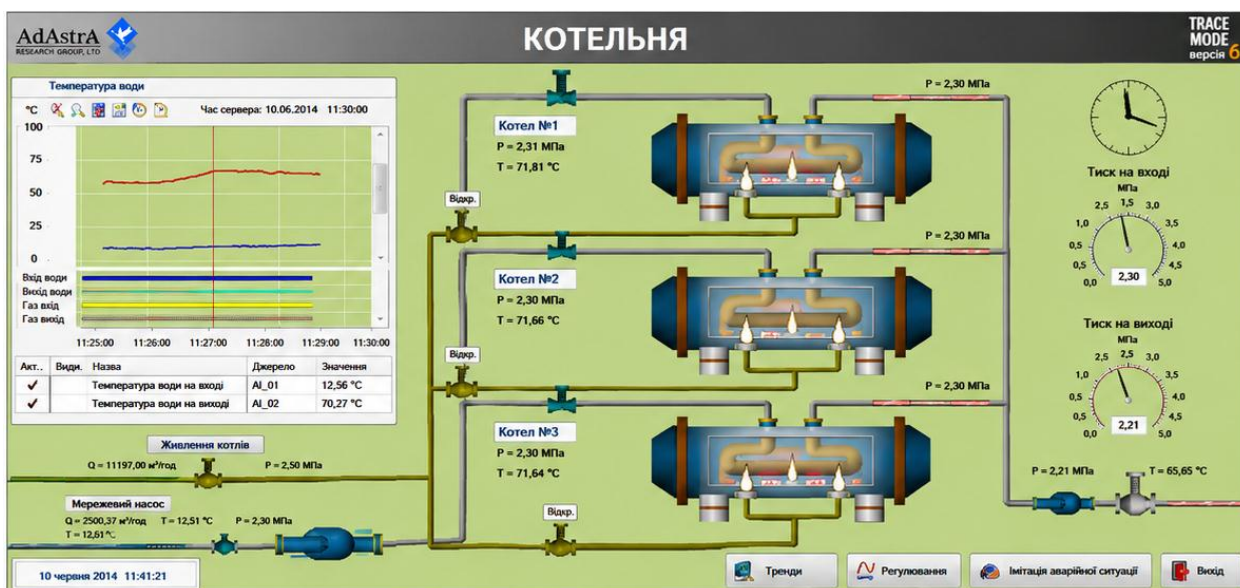


Рисунок 3.13 – Мнемосхема котельні із зображенням принципу роботи всіх котлоагрегатів та їх параметрів

Значення параметрів розміщені безпосередньо біля відповідного обладнання, що значно спрощує контроль стану системи. Праворуч екрана розташовані кругові індикатори тиску на вході та виході системи, які забезпечують швидке візуальне оцінювання режиму роботи котельні. У лівій

частині інтерфейсу відображається тренд зміни температури води та газу у вигляді графіка, що дозволяє аналізувати динаміку процесу в часі. У нижній частині екрана розміщені кнопки переходу між функціональними режимами системи: «Тренди», «Регулювання» та «Імітація аварійної ситуації».

Екран регулювання технологічних параметрів (рисунок 3.14) призначений для аналізу якості роботи систем автоматичного регулювання температури та тиску.

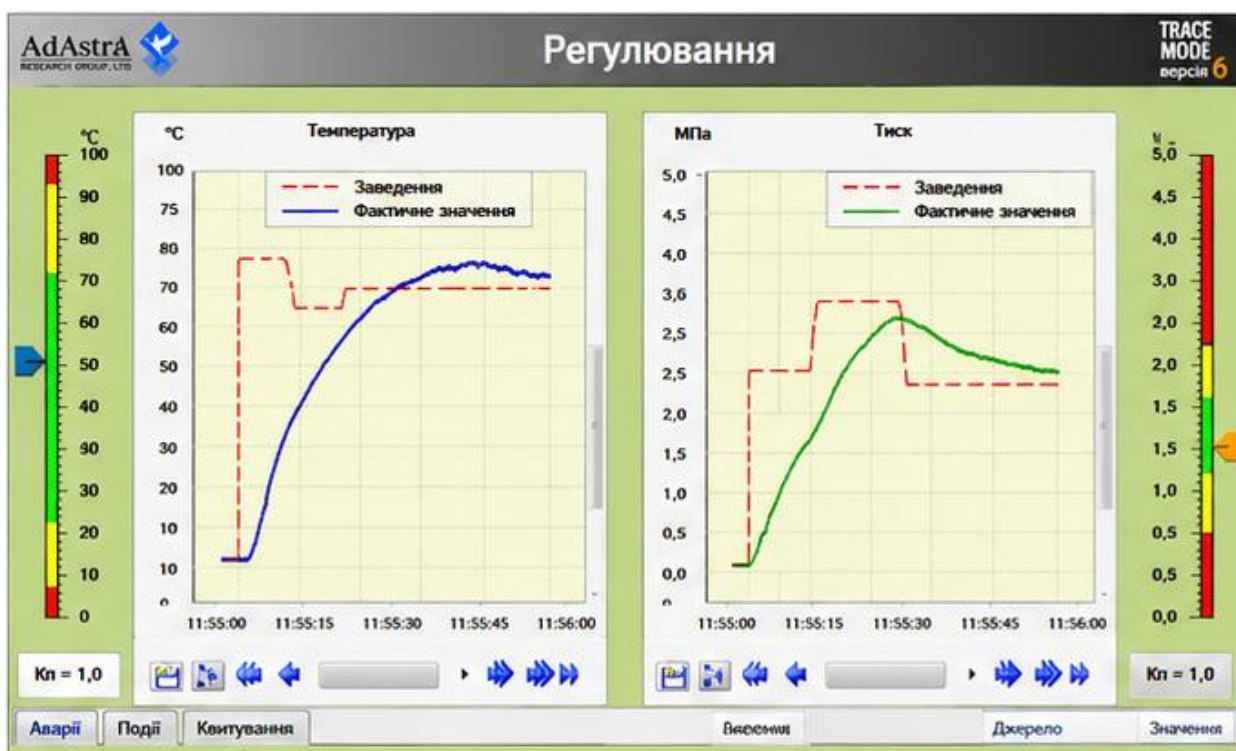


Рисунок 3.14 – Екран регулювання температури та тиску

На екрані одночасно відображаються графіки заданого та фактичного значення параметрів. Лівий графік демонструє процес регулювання температури, а правий — процес регулювання тиску. Пунктирною лінією показано задавальний сигнал, тоді як суцільна лінія відображає реакцію системи на зміну завдання. Така форма подання інформації дозволяє оператору оцінити швидкодію системи, величину перерегулювання та стійкість перехідного процесу. Додатково на екрані розташовані вертикальні шкали поточних значень параметрів та коефіцієнтів регулювання, що

забезпечує можливість оперативного налаштування системи автоматичного керування.

Для перевірки роботи системи захисту та дій оператора у нештатних ситуаціях передбачено режим імітації аварійних ситуацій (рисунк 3.15). Даний режим дозволяє моделювати виникнення аварійних станів без впливу на реальний технологічний процес.

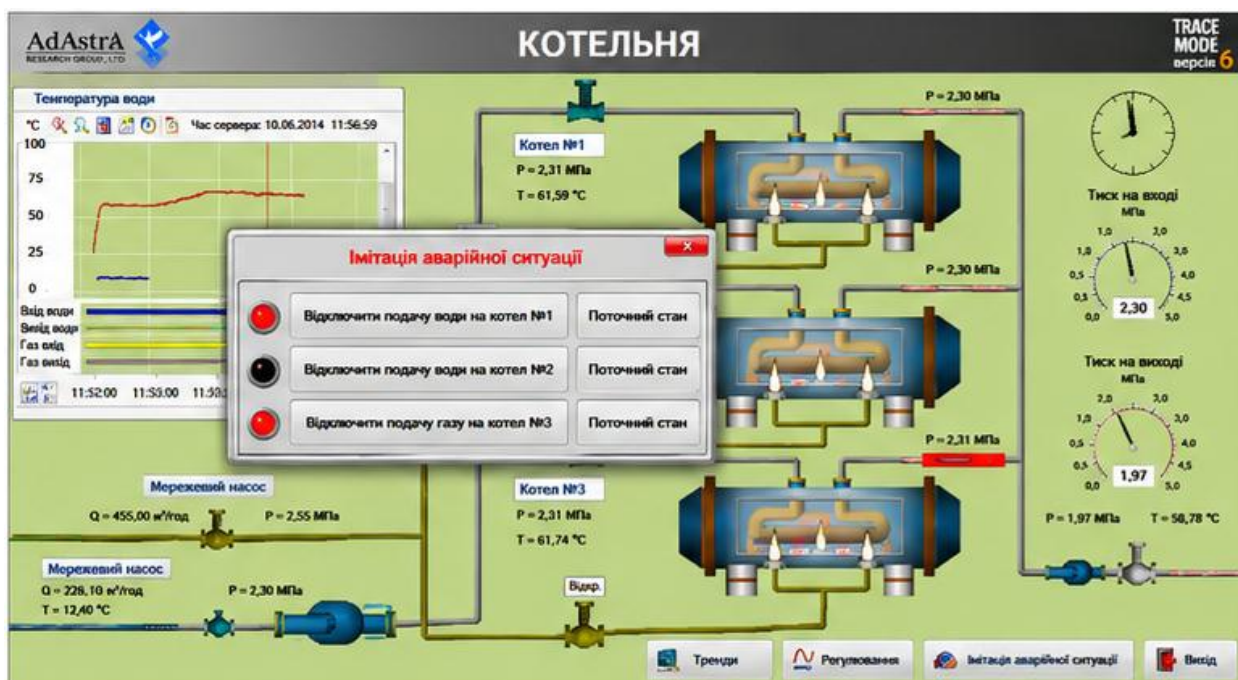


Рисунок 3.15 – Екран імітації аварійної ситуації

У вікні аварійних повідомлень оператор може ініціювати аварійне відключення подачі води або газу на окремий котлоагрегат. Після активації аварійного режиму система автоматично змінює колір відповідної ділянки трубопроводу та обладнання, а також формує повідомлення про аварійну подію. Це забезпечує швидке виявлення небезпечної ситуації та дозволяє персоналу відпрацьовувати алгоритми реагування на можливі порушення режиму роботи котельні.

Розроблений операторський інтерфейс забезпечує централізований контроль технологічного процесу, зручне дистанційне керування обладнанням, безперервний моніторинг параметрів та підвищення

оперативності дій персоналу. Використання мнемосхем, трендів та системи аварійної сигналізації дозволяє значно підвищити надійність і безпеку експлуатації котлоагрегатів, а також мінімізувати ймовірність виникнення помилок оператора під час керування технологічним процесом.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження та розроблено систему автоматичного контролю й регулювання технологічних параметрів котлоагрегату типу БКЗ-75-39 ФБ на теплоелектростанції.

Проведено детальний аналіз технологічного процесу роботи котлоагрегату. Розглянуто принцип природної циркуляції пароводяної суміші в екранних трубах, механізм відокремлення пари від води в барабані, а також роботу пароперегрівача, водяного економайзера та димососа. Встановлено, що котел є складною багатовимірною динамічною системою зі взаємопов'язаними входами і виходами, в якій ключовим параметром регулювання є тиск пари в барабані. Проаналізовано явище «набухання» рівня, яке виникає при різких змінах навантаження та суттєво ускладнює процес регулювання живлення котла.

Виконано параметричний синтез системи автоматичного регулювання. Методом апроксимації кривої розгону визначено передавальну функцію об'єкта регулювання першого порядку, де стала часу становить $T = 85$ хв, запізнення $\tau = 15$ хв, коефіцієнт підсилення $k = 44$. Похибка апроксимації не перевищила допустимого значення 5%, що підтвердило правомірність обраного методу. За результатами аналізу відношення обрано пропорційно-інтегральний (ПІ) закон регулювання, який забезпечує відсутність статичної похибки та здатність працювати з об'єктами, що мають значне запізнення.

Параметри налаштування регулятора визначено двома методами — табличним та методом розширених амплітудно-фазових характеристик. Оптимальні параметри налаштування, отримані методом розширених АФЧХ при ступені коливальності $m = 0,6$, склали: коефіцієнт підсилення $K_p = 0,0969$, час ізодрому $T_i = 73,02$ хв. Оцінка якості перехідного процесу показала: перерегулювання $\sigma = 15,8\%$ час перехідного процесу $t_p = 125$ хв, кількість коливань $N = 1$, ступінь затухання $\psi = 1$, що

					ДП.АКИТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

відповідає вимогам до якості регулювання тиску пари в барабані котла.

Обґрунтовано вибір технічного забезпечення системи. Для реалізації функцій контролю та регулювання сформовано комплект обладнання: промисловий Schneider Electric серії Harmony P6 зі ступенем захисту IP66 за класифікацією IEC 60529 та середнім напрацюванням на відмову 50 000 годин; перетворювачі тиску Метран-22 з класом точності 1,5, терміном служби 12 років та напрацюванням на відмову 100 000 годин; термоперетворювачі ТСПУ-205 з діапазоном вимірювання до 500°C і вихідним сигналом 4–20 мА; модулі віддаленого введення-виведення серії ADAM-4000 (ADAM-4017 для аналогових сигналів, ADAM-4013 для термометрів опору, ADAM-4052 для дискретних сигналів) з обміном даних по інтерфейсу RS-485 та перетворенням через ADAM-4520. Замість застарілих вторинних приладів КСД-2, перетворювачів МЕД і регуляторів Р-25 впроваджено єдиний комп'ютеризований комплекс із централізованою обробкою даних і розробленим операторським інтерфейсом у вигляді мнемосхем.

Розроблений операторський інтерфейс забезпечує наочне відображення стану технологічного процесу, дистанційне управління виконавчими механізмами, реєстрацію подій за 12-годинний період та можливість переходу між автоматичним і ручним режимами керування.

Впровадження спроектованої системи дозволяє досягти таких результатів: підвищення точності підтримання параметрів пари завдяки переходу від аналогових регуляторів Р-25 до цифрового ПІ-регулювання; скорочення чисельності обслуговуючого персоналу та підвищення продуктивності праці; зростання надійності роботи обладнання внаслідок безперервного автоматизованого моніторингу; підвищення безпеки виробництва через оперативну сигналізацію відхилень параметрів; зниження питомих витрат палива та енергоресурсів завдяки оптимізації режимів горіння і живлення котла.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таким чином, усі завдання, поставлені в кваліфікаційній роботі, вирішено в повному обсязі. Отримані результати підтверджують технічну обґрунтованість та практичну цінність розробленої системи автоматичного контролю й регулювання котлоагрегату БКЗ-75-39 ФБ для умов реальної теплоелектростанції.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойко В. С. Автоматизація технологічних процесів теплоенергетичних установок: підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 412 с.
2. Ключев О. В., Мельник М. І. Системи автоматичного керування енергетичними установками. Львів : Новий Світ-2000, 2020. 356 с.
3. Денисенко В. В. Автоматизація теплоенергетичних процесів: навчальний посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. 298 с.
4. Шарапов В. І., Деркач О. П. Теорія автоматичного керування: підручник. Київ : Ліра-К, 2021. 540 с.
5. Сегеда М. С. Теплові електричні станції та їх автоматизація. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. 478 с.
6. Ковриго Ю. М., Остапчук В. М. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Київ : Каравела, 2021. 384 с.
7. Теплоенергетичні установки та системи керування / за ред. П. Д. Лежнюка. Вінниця : ВНТУ, 2022. 430 с.
8. Бесекерський В. А., Попов Є. П. Теорія систем автоматичного регулювання. Київ : Техніка, 2020. 768 с.
9. Schneider Electric. Harmony P6 Industrial PC User Manual. Rueil-Malmaison : Schneider Electric, 2023. 215 p.
10. Advantech Co. ADAM-4000 Series User Manual. Taipei : Advantech, 2022. 340 p.
11. Датчики МЕТРАН-22, МЕТРАН-22ДД. Товариство з обмеженою відповідальністю науково-виробнича фірма «Стандарт-М». Режим доступу: http://standart-m.com.ua/kipia/datchiki-davleniya/datchiki-metran-22_-metran-22dd
12. TRACE MODE 6. SCADA System Documentation. AdAstra Research Group, 2022. 486 p.
13. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Tuning. 2nd ed. Research Triangle Park : ISA, 2021. 343 p.

14. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 14th ed. Boston : Pearson, 2021. 1045 p.

15. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A. Process Dynamics and Control. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2022. 512 p.

16. Bequette B. W. Process Control: Modeling, Design and Simulation. New Jersey : Prentice Hall, 2020. 800 p.

17. Bolton W. Instrumentation and Control Systems. 3rd ed. Oxford : Newnes, 2021. 688 p.

18. Lipták B. G. Instrument Engineers' Handbook: Process Control and Optimization. 5th ed. Boca Raton : CRC Press, 2022. 1260 p.

19. Marlin T. E. Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 2021. 912 p.

20. Балакіреєв В. С., Козлов О. І. Математичне моделювання динамічних систем. Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 290 с.

21. IEC 60529:2020 Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code). Geneva : International Electrotechnical Commission, 2020. 144 p.

22. ISA-TR5.9-2021 Graphic Symbols for Process Displays. Research Triangle Park : ISA, 2021. 96 p.

23. IEEE Standards Association. Industrial Automation and Control Systems Security. New York : IEEE, 2022. 178 p.

24. Wang L. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®. London : Springer, 2021. 410 p.

25. Nise N. S. Control Systems Engineering. 8th ed. Hoboken : Wiley, 2022. 944 p.

26. Ogata K. Modern Control Engineering. 6th ed. Boston : Pearson, 2021. 1073 p.

27. Мартиненко О. С. Автоматизація котлоагрегатів теплових електростанцій : монографія. Київ : НУХТ, 2023. 312 с.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

28. Праховник А. В., Рогоза М. Є. Енергоефективність теплоенергетичних установок. Київ : Політехніка, 2021. 368 с.

29. European Commission. Best Available Techniques for Large Combustion Plants. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2021. 957 p.

30. International Energy Agency. Digitalization and Energy Systems Control in Thermal Power Plants. Paris : IEA Publications, 2023. 214 p.

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ДОДАТОК А

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

					ДП.АКІТ.10658613.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		