

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – магістр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

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

тема роботи:
**«Автоматизація керування технологічними параметрами в парових
котлах насиченого типу на харчовому виробництві»**

Виконав студент гр. АКІТР-24-1м	_____ Тітенюк М. І.
Керівник	_____ Тиханський М. П.
Нормоконтроль	_____ Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 15 » липня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-1м Тітенку Максиму Ігоровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизація керування технологічними параметрами в парових котлах насиченого типу на харчовому виробництві»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка, презентація у Microsoft PowerPoint в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3

доц. Тиханський М. П.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	14.05.25
2	<i>Розділ 1</i>	20.05.25
3	<i>Розділ 2</i>	18.08.25
4	<i>Розділ 3</i>	19.09.25
5	<i>Висновки</i>	15.10.25
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	20.11.25
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	28.11.25
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	01.12.25

6. Дата видачі завдання: 13.05.2025р.

Керівник _____ / Тиханський М. П./

7. Запевнення: Я, Тітенюк Максим Ігорович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Тітенюк Максим Ігорович/

АНОТАЦІЯ

Тітенко Максим Ігорович. Автоматизація системи керування паровим котлом насиченої пари харчового підприємства.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра за спеціальністю 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2025, 73с.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку літератури. Загальний обсяг становить 73 сторінок, містить 5 таблиць і 28 рисунків.

Об'єкт дослідження - паровий котел насиченої пари. Предмет дослідження - автоматизована система регулювання його технологічних параметрів.

Мета роботи - розробка ефективної автоматизованої системи керування паровим котлом, спрямованої на підвищення енергоефективності, надійності та безпеки технологічного процесу.

У роботі проведено аналіз конструкції котла, виконано математичне моделювання процесів генерації насиченої пари, визначено основні контури регулювання та розроблено функціональну структуру системи автоматизації. Реалізовано алгоритми регулювання тиску, рівня води, розрідження та витрати палива, а також систему сигналізації й блокувань.

Запропонована система забезпечує стабільність параметрів пари, економію палива та підвищення безпеки роботи обладнання.

Ключові слова: ПАРОВИЙ КОТЕЛ, НАСИЧЕНА ПАРА, АВТОМАТИЗАЦІЯ, РЕГУЛЮВАННЯ, PLC, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

.

ABSTRACT

Automation of the Control System for a Saturated Steam Boiler of a Food Industry Enterprise.

The master's dissertation in the specialty 174 - Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics. Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2025, 73c.

The thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of references. The total volume is 73 pages and includes 5 tables and 28 figures.

The object of the study is a saturated steam boiler. The subject of the study is the automated control system of its technological parameters.

The aim of the thesis is to develop an efficient automated control system for a saturated steam boiler, focused on improving energy efficiency, reliability, and operational safety.

The work includes an analysis of the boiler design, mathematical modeling of saturated steam generation processes, identification of main control loops, and development of the functional structure of the automation system. Control algorithms for pressure, water level, furnace draft, and fuel consumption, as well as alarm and protection functions, were implemented.

The proposed system ensures stable steam parameters, reduced fuel consumption, and increased operational safety.

Keywords: STEAM BOILER, SATURATED STEAM, AUTOMATION, CONTROL, PLC, ENERGY EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ	11
1.1 Котли генерації пару	11
1.2 Принцип дії парових котлів	14
1.3 Котел насиченого типу на харчових підприємствах як засіб автоматизації.....	16
1.4 Характеристика технологічних параметрів керування	20
1.5 Проблеми та перспективи автоматизації парових котлів у харчовій промисловості.....	23
РОЗДІЛ 2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	29
2.1 Математичні моделі процесів управління об'єктом.....	29
2.2 Функціональна схема автоматизації парового котла насиченого типу	38
2.1 Технічні засоби автоматизації	40
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	50
3.1 Функціональна структура автоматизованої системи управління ...	50
3.1.1 Контроль основних параметрів технологічного процесу	50
3.1.2 Функції регулювання.....	51
3.1.3 Функції сигналізації при контроль основних параметрів технологічного процесу.....	52
3.1.4 Блокування та захист технологічного процесу за основними параметрами.....	53
3.2 Розробка програмної частини системи керування.....	54

3.2.1 Автоматична система керування економічністю витрати палива під час процесу горіння.....	56
3.2.2 Автоматична система керування підживленням котла водою.....	57
3.2.3 Автоматична система керування продувкою котла	58
3.2.4 Автоматична система керування теплового навантаження насиченою парою	60
3.2.4 Автоматична система керування розрідження в котельній топці ..	61
3.2.5 Автоматична система керування температурою пари	61
3.3 Моделювання та аналіз автоматизованої системи керування	62
3.3.1 Автоматична система керування живлення водою	63
3.3.1 Автоматична система керування безперервною продувкою.....	64
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	73

ВСТУП

Сучасні інфраструктури харчових підприємств все частіше потребують використання насиченої водяної пари в своїх технологічних процесах, яка, в свою чергу, генерується паровими котлами. Стабільне та ефективне постачання пару дозволяє будувати системи, які мають більшу якість та кількість виготовляємої продукції. Серед переваг використання пару можна виокремити універсальність застосування, ефективність рівномірного розподілу теплової енергії та вологи, економічне використання енергоресурсів.

В цьому процесі важливо дотримуватися оптимальних технологічних параметрів генерації пару, таких як: тиск та температура пару, рівень води в котлах, подача палива тощо.

Беручи вищевикладене до уваги, якісний контроль та підтримання заданих параметрів має стратегічне значення у технологічному процесі, що відкриває окремий напрям в удосконаленні виробництва та оптимізації ресурсів.

Парові котли як джерело теплової енергії широко використовуються в різноманітних технологічних процесах: пастерізації, стерилізації, варіння, дезінфекції тощо. Чітке та правильне регулювання котлів дозволяє налагодити ефективне відмовостійке виробництво та знизити витрати як на енергоносії, так і на ремонт обладнання. Якісна регуляція генерації насиченої водяної пари також підвищує безпечне обслуговування теплових агрегатів. Підсумовуючи дані фактори, якісна автоматизована система керування паровими котлами набуває особливої актуальності в виробничих процесах харчової промисловості.

Традиційні методи керування паровими котлами часто містять в собі застарілі системи або низькоефективні схеми керування, що побудовані на основі ручного регулювання або примітивних релейних схемах. Це призводить до нестабільних режимів генерації водяної пари, підвищених витрат ресурсів. Дані умови створюють необхідність побудови сучасних автоматизованих систем керування на базі програмованих логічних контролерів та систем оперативного моніторингу на основі програмного забезпечення з використанням технологій SCADA.

Використання сучасних систем автоматизованого керування процесом дозволяє реалізувати високий якісний рівень факторів технологічного процесу генерації насиченого пару:

1. Стабільна робота котлів і супутнього обладнання в визначених технологічних параметрах;
2. Виявлення та локалізація відхилень у процесі генерації;
3. Побудова стійкої системи;
4. Попередження аварійних ситуацій;
5. Коректна реакція системи на аварійні ситуації;
6. Зменшення людського фактору;
7. Підвищення рівня безпеки обслуговуючого персоналу;
8. Оперативна реакція на зміну параметрів роботи технологічного процесу.

При впровадженні сучасних систем автоматизованого управління генерацією насиченого пару наявна потреба ретельного аналізу необхідних технологій та програмних забезпечень, створення алгоритмів роботи системи та визначення характеристик обладнання. Також слід врахувати особливості технологічного процесу, якість генеруємого пару та способи енергозбереження.

Отже, створення сучасної системи автоматизованого керування генерацією насиченого пару є актуальним завданням для харчових підприємств,

так як парові котли є одним із ключових частин виробничої структури харчової промисловості.

Таким чином сучасна автоматизована система керування генерації насиченого пару повинна відповідати таким вимогам:

1. Автоматичне керування паровим котлом здійснюється за параметрами, які отримуються від технологічним датчиків;
2. Автоматизований початок та закінчення роботи за командою оператора;
3. Система необхідним захисних механізмів та блокувань;
4. Запуск та зупинка допоміжного технологічного обладнання, яке взаєпов'язане з генерацією пару котлом;
5. Виключення подальшого запуску, якщо елементами автоматизованої системи визначено некоректний початок роботи одного з елементів технологічного процесу генерації пару;
6. Світлозвукова сигналізація при запуску, зупинці та виникненні аварійної ситуації на лінії;
7. Автоматична система перевірки цілісності лінії світлозвукової сигналізації оповіщення.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ

1.1 Котли генерації пару

Парові котли (рис. 1.1) є важливим джерелом енергії на харчових заводах. Вони використовуються для приготування їжі, обробки, стерилізації, сушіння, очищення обладнання та підтримки температури реакторів, резервуарів для зберігання та іншого виробничого обладнання. Перевага пари над іншими теплоносіями полягає в її здатності передавати велику кількість тепла за відносно стабільної температури та легкому транспортуванні трубопроводами.[3,9]



Рисунок 1.1 – Промисловий паровий котел

У харчовій промисловості виробництво пари є ключовим компонентом більшості виробничих циклів. Застосування пари включає:

- Термічну обробку сировини (варіння, пастеризацію, стерилізацію);
- Дезінфекцію обладнання (очищення та стерилізацію труб, резервуарів та поверхонь);
- Підтримку необхідної температури в теплообмінниках, автоклавах та варильних чанах;
- Виробництво гарячої води;
- Привід певного обладнання (парові мішалки, преси, клапани тощо);
- Опалення та вентиляцію виробничих приміщень.

Парові котли мають широкий спектр специфік, які обираються відповідно до особливостей підприємства та поставлених задач. В таблиці 1.1 наведено основний перелік ознак, за якими класифікують парові котли.

Таблиця 1.1 – Ознаки класифікації парових котлів

Ознака класифікації	Варіанти
<i>Тип теплоносія</i>	Насичена пара, перегріта пара
<i>Тиск</i>	Низький (до 0,07 МПа), середній (0,07–1,6 МПа), високий (>1,6 МПа)
<i>Тип циркуляції</i>	Природна, примусова, комбінована
<i>Спосіб спалювання палива</i>	Газові, рідкопаливні, твердопаливні, електричні
<i>Конструкція</i>	Барабанні, прямоточні, водотрубні, жаротрубні
<i>Призначення</i>	Промислові, енергетичні, допоміжні

Парові котли складаються з кількох основних компонентів, кожен з яких відіграє певну роль у процесі виробництва пари:

- Камера згоряння – це місце, де паливо спалюється та виробляється тепло. Сучасні котли зазвичай використовують газові або комбіновані

пальники, які забезпечують ефективне згоряння завдяки стабільній подачі палива та повітря;

- Барабан котла – це циліндричний контейнер, через який циркулює вода, відокремлюючи пару від рідкої фази. Усередині барабана стабільна теплогідравлічна система підтримує необхідний рівень води та стабільну швидкість випаровування;

- Поверхня теплообміну – це система трубопроводів, через яку вода циркулює та передає тепло від продуктів згоряння. Це доводить воду до точки кипіння та сприяє випаровуванню;

- Система живильної води – це насосний пристрій, який забезпечує стабільну подачу води до барабана котла. Рівень води – це важливий параметр, який необхідно постійно контролювати;

- Система відбору пари: це стосується трубопроводів та пристроїв керування, які подають пару до різних компонентів виробничої лінії компанії;

- Система безпеки та керування включає манометри, датчики температури, індикатори рівня, реле тиску, запобіжні клапани, аварійні вимикачі тощо;

Тому вибір правильного типу парового котла повинен базуватися на аналізі вимог виробничого процесу, параметрів пари та економічних умов. Розуміння класифікації та конструктивних особливостей котлів допомагає забезпечити ефективну роботу, економію енергії та дотримання вимог безпеки. У харчовій промисловості котли насиченої пари середнього тиску є найкращим вибором, оскільки вони прості в експлуатації, високоефективні та підходять для автоматизації великих процесів. [15]

1.2 Принцип дії парових котлів

Парові котли є основним джерелом тепла для багатьох підприємств, особливо в харчовій промисловості. Основна функція котла полягає в перетворенні хімічної енергії палива на теплову та передачі цієї енергії воді для виробництва пари. Коли вода нагрівається, вона випаровується та утворює насичену або перегріту пару, яка потім подається користувачеві.

Незалежно від його конструкції, принцип роботи парового котла базується на наступному циклі:

1. Живильна вода та попередня обробка.

Для забезпечення стабільної та безпечної роботи котла воду необхідно ретельно попередньо обробити. Щоб запобігти утворенню накипу, корозії та гідравлічних ударів, зазвичай використовується деоксигенована прісна вода. Живильний насос забезпечує надходження води до котла під необхідним тиском. У деяких системах також виконується попереднє нагрівання живильної води для підвищення ефективності теплопередачі.

2. Процес згоряння палива.

Паливо (зазвичай природний газ, рідше мазут або тверде паливо) подається до пальника та змішується з повітрям в оптимальному співвідношенні для забезпечення повного згоряння. Температура гарячих газів, що утворюються в результаті горіння, може досягати від 1200 до 1500°C. Автоматичне керування подачею палива та повітря забезпечує ефективне горіння.

3. Теплообмін.

Гарячі гази, що виходять з камери згоряння, проходять через поверхні теплообміну (трубки або гарячі канали) та нагрівають воду, що циркулює в котлі. Залежно від конструкції котла (трубчастий, водяний або змішаний), розташування елементів теплообміну варіюється, але принцип залишається незмінним: передача тепла від продуктів згоряння до води.

4. Процес випаровування.

Коли вода досягає точки кипіння (вище 100°C, залежно від тиску), вона перетворюється на пару. У барабанних котлах цей процес відбувається в паропроводах, і пароводяна суміш закачується в барабан. Пара та вода розділяються під дією сили тяжіння. У проточних котлах випаровування та розділення пари досягаються шляхом циркуляції води через теплообмінник без застою.

5. Розділення та подача пари.

Відділена пара направляється до приймального обладнання, такого як теплообмінники, стерилізатори та автоклави. Решта води повертається до котла через цикл конденсації або рециркулює в систему підготовки пари. Для оптимізації енергоефективності деякі котли перегрівають пару до певної міри.

6. Відведення димових газів.

Після проходження через поверхні теплообмінника продукти згоряння відводяться через димохід. Для зменшення втрат тепла відхідні гази можуть проходити через теплообмінник-відхідник, де вода або повітря, що подає пальник, попередньо нагріваються.

7. Система керування та безпеки.

Процеси котла контролюються автоматичною системою, яка регулює подачу палива, води та повітря та контролює тиск, температуру та рівень води. Ще одним важливим елементом є система безпеки, яка включає такі функції:

- Пристрій аварійного відключення;
- Запобіжні клапани;
- Вихідний сигнал у разі відхилення від ключових параметрів;
- Блокування у разі несправності.

Сучасні котли використовують програмовані логічні контролери (ПЛК) для забезпечення точності, адаптивності та інтеграції з системою моніторингу компанії (SCADA, OPC-сервер).

Сьогодні парові котли розроблені з повним урахуванням енергозбереження та захисту навколишнього середовища. Використання економайзерів, теплоциркуляційних агрегатів, модулюючих пальників та систем відновлення оксидів азоту сприяє зменшенню витрат палива та викидів забруднюючих речовин.

Таким чином, принцип роботи парового котла базується на сукупності взаємопов'язаних фізичних та технологічних процесів, що перетворюють енергію палива на корисну пару. Ефективність цих процесів значною мірою залежить від конструкції котла, якості водоочищення, умов експлуатації та автоматизованого керування. [17]

1.3 Котел насиченого типу на харчових підприємствах як засіб автоматизації

Котли насиченої пари (рис 1.2) використовуються завдяки своїй високій теплоємності, ефективній та рівномірній теплопередачі, а також безпеці для обладнання та поверхонь, що контактують з харчовими продуктами. На відміну від перегрітої пари, насичена пара не викликає надмірного висихання сировини або псування термочутливих інгредієнтів.

Функціонал основних узлів котла насиченої пари:

1. Топка (гофрована топка): розташована в передній частині котла. Має гофровану структуру для компенсації теплового розширення. Усередині топки розміщено пальник, який подає і спалює паливо (газ, дизель, мазут). Температура всередині досягає 900–1400 °С. Слугує для створення теплової енергії;

2. Перший, другий і третій проходи труб:

2.1. 1-й прохід: гарячі гази рухаються прямо з топки до оборотної камери;

2.2. 2-й прохід: зворотна камера перенаправляє гази в пучок прямих жарових труб. Тут теплообмін найбільш інтенсивний;

2.3. 3-й прохід: гази проходять через другий пучок труб і далі виходять у димову трубу.

Виконує максимальний відбір тепла водою, підвищення ККД;

3. Поворотна камера: місце, де гази змінюють напрямок з 1-го на 2-й прохід. Робиться водоохолоджуваною або сухою. Відповідає за ефективний розподіл газового потоку;
4. Корпус котла: нержавіючий циліндр, заповнений водою. Всередині закріплені жарові труби, топка та перегородки. Робочий тиск в ньому від 6 до 16 бар;
5. Оглядові люки: дозволяють виконувати огляд, очищення, гідровипробування;
6. Головний запірний паровий клапан: встановлений на паровідбірному патрубку. Слугує для перекриття подачі пари в систему;
7. Манометр: показує поточний тиск;
8. Датчики рівня води (зонди безпеки): контролюють нижній і верхній рівні. При низькому рівні вимикають котел, щоб уникнути вибуху;
 9. Реле тиску: основне та резервне. Вмикає/вимикає пальник залежно від тиску;
10. Пальник: складається з вентилятора, форсунки, камери змішування, системи керування. Відповідає за подачу палива у котел, забезпечення потрібного співвідношення «паливо-повітря» та за стабільне горіння;
11. Живильні насоси: забезпечують подачу води в котел під тиском;
12. Фільтри живильної води: видаляють механічні включення, захищають арматуру й котел від забруднення;
13. Модуляційний клапан живильної води: регулює подачу води плавно, залежно від потреби в парі;

14. Економайзер: теплообмінник у димовому каналі, який підігріває воду, використовуючи тепло димових газів.

У харчовій промисловості стабільність та якість пари мають першочергове значення. Коливання температури, тиску та вологості пари можуть призвести до поганої якості готового продукту, невідповідності вимогам рецептури або навіть псування сировини. Тому парові котли використовуються не лише як джерело енергії, але й як обладнання, що вимагає високої стабільності параметрів, що робить їх важливим вузлом автоматизації.

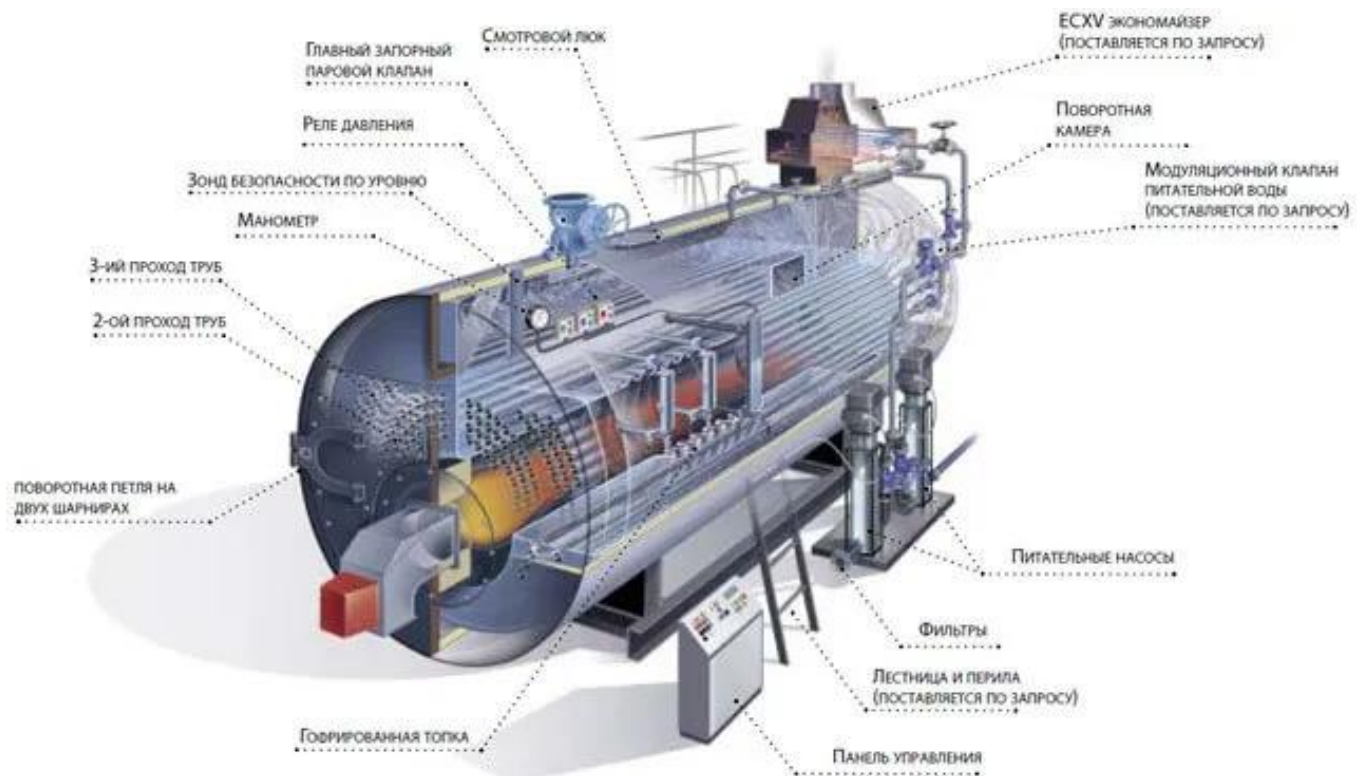


Рисунок 1.2 – Структура парового котла насыщенного типа

Для забезпечення ефективної та безпечної роботи парового котла необхідно постійно контролювати та регулювати кілька важливих технічних параметрів:

- Тиск пари - найважливіший параметр, що визначає його енергетичний потенціал. Перепади тиску призводять до неефективних технологічних процесів, тоді як надлишковий тиск збільшує ризик аварій;

- Температура пари: У насичених котлах температура пари безпосередньо залежить від тиску, але її необхідно контролювати, щоб уникнути нестабільності;
- Рівень води в барабані є одним з найважливіших показників. Рівень води нижче допустимої межі може призвести до перегріву та пошкодження котла, тоді як високий рівень води може призвести до потрапляння крапель води в парову систему;
- Співвідношення повітря/паливо визначає ефективність та повноту згоряння. Нестача повітря призводить до недостатнього згоряння палива, тоді як надлишок повітря – до надмірного зносу палива;
- Температура вихлопних газів надає інформацію про ефективність теплообміну та стан пальника.

У традиційних системах керування паровими котлами оператор або регулює параметри вручну, або використовує локальне автоматичне керування.[2] Однак цей метод має багато обмежень, включаючи повільну швидкість відгуку, високий рівень помилок, надмірну витрату палива, високий знос обладнання та великі втрати енергії. (табл. 1.2)

Таблиця 1.2 – Порівняльна таблиця котлів насиченої та перегрітої пари

Параметр	Котел насиченої пари	Котел перегрітої пари
<i>Температура пари</i>	Залежить від тиску ($\approx 151\text{--}193\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Вища за температуру насичення (до $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ і більше)
<i>Використання в харчовій промисловості</i>	Переважає (безпечна для продуктів)	Обмежено (агресивна дія на структуру продуктів)
<i>Вимоги до матеріалів</i>	Стандартні сталі	Жаростійкі матеріали
<i>Енерговитрати на підігрів</i>	Нижчі	Вищі
<i>Сфера застосування</i>	Харчова, хімічна, фармацевтика	Енергетика, промислові турбіни

Автоматизованне керування може вирішити ці проблеми шляхом впровадження мікропроцесорних контролерів, систем дистанційного моніторингу, датчиків та виконавчих механізмів. Основні ролі автоматизації:

- Підтримка стабільного тиску пари відповідно до потреб користувача;
- Автоматичне регулювання подачі палива та повітря;
- Контроль рівня води в барабані в режимі реального часу;
- Виконання аварійної зупинки у разі значних відхилень параметрів;
- Збір даних для аналізу, оптимізації та прогнозування.

Тому котли насиченої пари стали основним елементом технологічного ланцюжка, і сучасні методи керування є необхідними. Автоматизація не тільки забезпечує стабільність процесу, але й дозволяє інтеграцію із загальними системами управління виробництвом (SCADA, MES), що особливо важливо в умовах цифрової трансформації галузі.

1.4 Характеристика технологічних параметрів керування

Під час роботи парового котла підтримка стабільності та точності параметрів процесу має вирішальне значення. Ці параметри визначають не тільки ефективність пари, але й безпеку обладнання, якість продукції та ефективність виробництва. Розглянемо основні параметри процесу, які автоматично контролюються та регулюються:

1. Температура.

Температура є критичним параметром у процесі виробництва пари. Наступні температури необхідно постійно контролювати:

- Живальна вода;
- Пара на виході з котла;
- Відпрацьований газ;

- Стінка теплообмінника.

Коливання температури можуть призвести до таких проблем:

- Зниження ефективності теплопередачі;
- Підвищений ризик термічної деградації металів;
- Утворення конденсату в паропроводах.

Системи автоматичного керування повинні забезпечувати точне та динамічне регулювання температури в межах допустимого діапазону.

2. Тиск пари.

Тиск пари в котлі є важливим критерієм стабільності всього процесу. Занадто високий тиск може спричинити поломки, тоді як занадто низький тиск може призвести до недостатнього тепла під час процесу. Регулювання тиску досягається шляхом контролю кількості палива, повітря та води, що подається. ПІД-контролери часто використовуються для плавного регулювання клапанів тиску.

3. Рівень води в барабані.

Контроль рівня води забезпечує безпеку та надійність котла. Низький рівень води може спричинити перегрів паропроводів, тоді як високий рівень може спричинити проникнення води. Для контролю рівня води використовуються такі датчики:

- Датчики диференціального тиску
- Датчики рівня рідини
- Ємнісні та ультразвукові датчики

Автоматичні системи керування підтримують рівень води на оптимальному рівні, керуючи насосом або клапаном подачі води.

4. Витрата палива та повітря.

Для досягнення повного згоряння палива та мінімізації вихлопних газів необхідно підтримувати оптимальне співвідношення палива та повітря. Надлишок повітря знижує ефективність, а недостатня кількість повітря призводить до утворення чадного газу та сажі. Сучасні системи керування

використовують витратоміри для контролю подачі повітря та її регулювання в режимі реального часу.

5. Коефіцієнт надлишку повітря.

Цей параметр визначає співвідношення між подачею повітря в пальник та теоретичною потребою в повітрі. Коефіцієнт надлишку повітря в сучасних котлах становить від 1,05 до 1,3. Системи автоматизації можуть динамічно регулювати цей показник залежно від навантаження котла.

6. Витрата пари.

Навантаження парового котла регулюється залежно від вимог процесу. Система автоматизації повинна динамічно регулювати подачу палива та води на основі споживання пари.

7. Склад димових газів.

Моніторинг складу димових газів (вміст чадного газу, оксидів азоту та кисню) дозволяє оцінити ефективність згоряння палива та перевірити відповідність екологічним стандартам. Аналізатори димових газів є важливим компонентом автоматизованих систем управління. Блок управління оптимізує процес горіння на основі зібраних даних.

8. Термічний ККД котла.

Це комплексний показник, який залежить від усіх вищезазначених параметрів. Автоматизація допомагає підтримувати високу ефективність, мінімізуючи споживання енергії.

У практиці теплову продуктивність часто визначають за формулою:

$$Q = G * (i_2 * i_1)$$

де:

Q - теплова продуктивність, кВт;

G - витрата пари, кг/год;

i₂ - ентальпія насиченої пари, кДж/кг;

i₁ - ентальпія живильної води, кДж/кг.[10]

Цей показник також використовується для визначення питомої витрати палива на вироблення 1 тонни пари, що впливає на економічні показники роботи котельної установки.

Кожний параметр має свій метод контролю, який використовує відповідні засоби автоматизації. (табл. 1.3)

Таблиця 1.3 – Засоби та методи контролю параметрів парогенерації

Параметр	Метод контролю	Засоби автоматизації
<i>Температура</i>	Термоелектричні датчики, термопари	ПЛК, ПД-регулятори
<i>Тиск пари</i>	Манометри, тензодатчики	Електропневматичні клапани
<i>Рівень води</i>	Поплавкові, ємнісні датчики	Живильні насоси з інверторами
<i>Витрати палива</i>	Витратоміри масові, об'ємні	Регулятори зворотного зв'язку
<i>Надлишок повітря</i>	Газоаналізатори	Частотні перетворювачі
<i>Витрати пари</i>	Витратоміри, витратні шайби	Адаптивні алгоритми регулювання
<i>Склад димових газів</i>	Газоаналізатори	Екосервери та SCADA

Підтримка оптимальних технологічних параметрів у парових котлах є важливою для стабільної, безпечної та енергоефективної роботи. Впровадження сучасних автоматизованих систем керування може підвищити точність та гнучкість керування, одночасно знижуючи експлуатаційні витрати.

1.5 Проблеми та перспективи автоматизації парових котлів у харчовій промисловості

У харчовій промисловості автоматизація процесу виробництва пари є важливою для підвищення енергоефективності, надійності та безпеки

виробництва. Однак впровадження автоматизованої системи керування паровими котлами створює численні труднощі та вимагає глибокого технічного аналізу та сучасних технологічних рішень. У цьому розділі розглядаються поточні проблеми, з якими стикаються компанії в автоматизації котлів, та визначаються напрямки майбутнього розвитку.

Основні проблеми, пов'язані з автоматизацією парових котлів

1. Старіння обладнання.

Багато харчових компаній досі використовують парові котли етично та технічно застарілих конструкцій, які неможливо інтегрувати в сучасні системи автоматизації. До цих проблем належать:

- Відсутність стандартизованих датчиків температури, тиску та рівня або недостатнє обладнання;
- Використання аналогових систем керування без цифрової обробки сигналів;
- Старе обладнання не відповідає сучасним стандартам безпеки та екологічності.

У цьому випадку впровадження системи автоматизації вимагає часткової або повної модернізації котельного обладнання.

2. Неточні вимірювання параметрів.

Стабільність роботи автоматизованої системи керування значною мірою залежить від точності основних вимірювальних приладів. Використання ненадійних або повільних датчиків може призвести до таких проблем:

- Неправильне керування подачею палива або води;
- Коливання параметрів процесу;
- Зниження енергоефективності процесу.

Особливу увагу слід приділити вибору сучасних датчиків з цифровими інтерфейсами, високою чутливістю та стабільністю.

3. Обмежена гнучкість системи керування.

Деякі системи автоматизації парових котлів, особливо старіші, спираються на логіку релейних контактів або прості програмовані логічні контролери (ПЛК) і не можуть адаптуватися до коливань виробничого навантаження. У цьому випадку вони не можуть:

- Регулювати режим роботи на основі поточного споживання пари;
- Оптимізувати споживання палива;
- Інтегруватися з системою SCADA компанії.

Сучасна практика вимагає використання високофункціональних та модульних ПЛК.

4. Високі вимоги безпеки.

Виробництво пари – це потенційно небезпечний процес, який вимагає постійного контролю рівня води, тиску та температури. Відмова системи автоматизації може призвести до серйозних інцидентів, таких як перегрів обладнання, розриви труб або вибухи парових барабанів. Таким чином, система автоматичного керування повинна відповідати стандартам SIL (рівень цілісності безпеки) та включати механізми аварійного вимкнення.

5. Людський фактор.

Навіть на автоматизованих заводах обслуговуючий персонал відіграє важливу роль. Недостатня підготовка операторів, недостатнє розуміння принципу роботи системи автоматизації або ігнорування сигналів тривоги можуть призвести до несправності та виходу з ладу всієї системи.

Незважаючи на труднощі, технологія автоматизації котлів продовжує стрімко розвиватися, пропонуючи нові можливості для харчової промисловості:

1. Інтелектуальна система керування.

Сучасні системи автоматизації базуються на програмованих логічних контролерах (ПЛК) та підтримують такі функції:

- Реалізація складних алгоритмів керування (ПД, адаптивне керування, нечітке керування);
- Усунення несправностей та діагностика в режимі реального часу;

- Автоматичне перемикання режимів роботи на основі продуктивності виробничої лінії.

2. Інтеграція з системами SCADA та MES.

Інтеграція системи керування котлом з ІТ-системою компанії досягає таких цілей:

- Відображення стану установки в режимі реального часу за допомогою мнемоніки;
- Збереження історії змін параметрів для подальшого аналізу;
- Керування розподілом з централізованої системи керування;
- Автоматична генерація звітів про споживання палива, енергії та пари.

3. Застосування енергозберігаючих технологій.

Інноваційні рішення для підвищення енергоефективності котлів включають:

- Економайзери для рекуперації тепла;
- Регенератори;
- Частотно-регульовані приводи для насосів та вентиляторів;
- Саморегульовальні аналізатори димових газів для оптимального горіння.

4. Впровадження IoT та Industry 4.0.

Останні досягнення в IoT та Industry 4.0 відкривають нові можливості:

- Збір даних з десятків датчиків у хмарі.
- Прогнозування збоїв за допомогою машинного навчання.
- Віддалений моніторинг та технічна підтримка.
- Побудова цифрового двійника для моделювання сценаріїв роботи котла.

5. Автоматичні функції безпеки та самодіагностика.

Системи керування все більше зосереджуються на автономному виявленні аномалій обладнання:

- Автоматизація заблокованих клапанів або збоїв датчиків.
- Відображення повідомлень на екрані НМІ або в мобільному додатку.
- Аварійне відключення при досягненні граничних значень.

Автоматизація парових котлів у харчовій промисловості залишається складним завданням, особливо для компаній, що використовують застарілу сировину. Однак розвиток інтелектуальних систем керування, поява доступних програмованих логічних контролерів, інтеграція з промисловими мережами та досягнення в технологіях IoT пропонують значний потенціал для спрощення процесу нагрівання. Ефективна автоматизація котлів підвищує енергоефективність, знижує витрати, покращує якість продукції та забезпечує безпечну роботу обладнання в сучасних умовах виробництва харчових продуктів.

Висновки за розділом

У даному розділі було проведено детальний аналіз особливостей парових котлів насиченого типу, що застосовуються у харчовій промисловості. Розглянуто конструктивні елементи та принцип роботи обладнання, визначено його роль як джерела енергії для забезпечення теплових і технологічних процесів.

Особливу увагу приділено опису основних технологічних параметрів, які підлягають контролю та автоматичному регулюванню, серед яких: температура, тиск пари, рівень води в барабані, витрати палива та повітря, коефіцієнт надлишку повітря, витрати пари та склад димових газів. Проаналізовано їх вплив на енергоефективність, надійність та безпеку роботи обладнання.

Було також показано, що парові котли є складними багатопараметричними об'єктами керування з високою інерційністю та взаємозалежністю параметрів. Це визначає необхідність впровадження автоматизованих систем управління, які здатні забезпечити точність регулювання, зниження енерговитрат, відповідність екологічним нормам та стабільність виробничих процесів.

Таким чином, проведений аналіз підтвердив актуальність автоматизації керування технологічними параметрами в парових котлах насиченого типу. Отримані результати стали основою для подальшої ідентифікації математичної моделі об'єкта та розробки ефективних алгоритмів керування, що розглядатимуться у наступному розділі.

РОЗДІЛ 2

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

2.1 Математичні моделі процесів управління об'єктом

Ефективне автоматичне керування паровим котлом насиченого типу вимагає точного розуміння його динамічних характеристик та взаємозв'язку основних технологічних параметрів. Оскільки паровий котел є складною теплотехнічною системою з нелінійними та інерційними процесами, його поведінка не може бути описана простими статичними залежностями. Тому для побудови якісної системи керування необхідно виконати математичне моделювання фізичних процесів, що відбуваються в котлі, а також ідентифікувати параметри цієї моделі на основі експериментальних або розрахункових даних. [23]

У цьому розділі розглядається послідовність дій, що дозволяє отримати адекватну математичну модель парового котла насиченого типу, яка відображає теплові, гідродинамічні та масообмінні процеси, характерні для його роботи. Особливу увагу приділено моделюванню таких ключових параметрів, як тиск та температура пари, рівень води в барабані, швидкість випаровування, тепловий баланс котла та вплив зовнішніх і внутрішніх збурень.

Після формування математичної моделі виконується ідентифікація її параметрів, що передбачає використання експериментальних даних або симуляційних методів для уточнення коефіцієнтів, які визначають динаміку об'єкта.

Це дає змогу отримати модель, яка відповідає реальним режимам роботи котла і може бути застосована для синтезу сучасних систем автоматичного керування.

Завершальним етапом є розробка алгоритмів керування, здатних забезпечити стабільну генерацію насиченої пари при мінімальних енерговитратах та високому рівні надійності. У межах розділу розглядаються класичні та сучасні методи керування, включаючи ПІД-регулювання, адаптивні та предиктивні алгоритми, а також структурна реалізація системи управління з використанням програмно-технічних засобів.

Ефективність процесу спалювання палива безпосередньо оцінюється за складом димових газів, зокрема за концентрацією кисню (O_2) та діоксиду вуглецю (CO_2). Ці показники відображають повноту згоряння та рівень втрат енергії з відхідними газами. Оптимальні значення кисню вказують на те, що кількість поданого повітря є достатньою для повного згоряння, але не надмірною, оскільки надлишкове повітря призводить до зниження температури полум'я та втрат тепла.

Регулюючим фактором у цьому процесі виступає витрата повітря, яка керується зміною продуктивності дуттьового вентилятора або корекцією положення повітряних заслінок. Завдяки цьому система може підтримувати оптимальний коефіцієнт надлишку повітря залежно від поточних умов роботи котла та вимог до теплової продуктивності.

При цьому зміна витрати палива є зовнішнім збуренням для системи горіння. Збільшення або зменшення подачі палива порушує баланс між паливом і повітрям, що призводить до тимчасового відхилення складу димових газів від оптимальних значень. Саме тому автоматизована система керування має враховувати ці зміни та відповідно коригувати подачу повітря, забезпечуючи стабільність процесу горіння та максимальну теплотехнічну ефективність котла.

Модель зв'язків між параметрами, які є характеристикою процесу використання палива, показано на рисунку 2.1

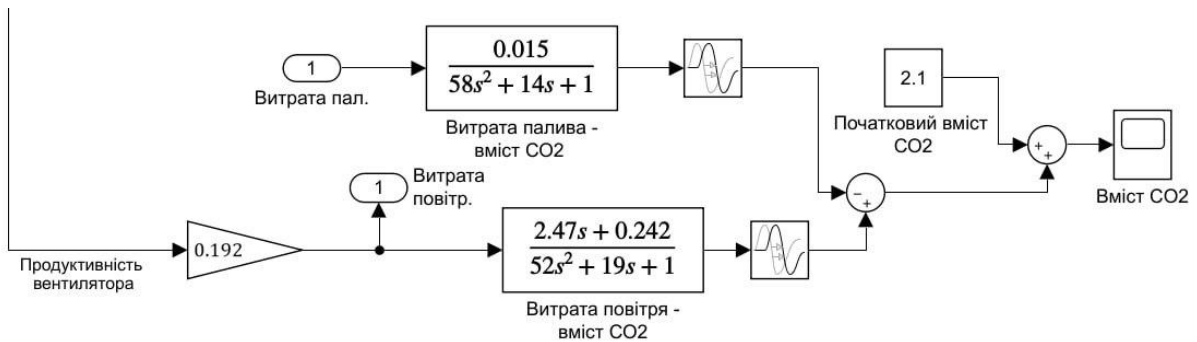


Рисунок 2.1 – Математична модель витрат палива під час горіння

Передаточні функції відповідних каналів на схемі мають такий вигляд:

- Взаємозв'язок між продуктивністю вентилятора та витратою повітря:

$$W(S) = 0.192$$

- Вміст O_2 у витрачаємому повітрі:

$$W(S) = \frac{2,16s + 0,194}{46s^2 + 19s + 1} * e^{-43s}$$

- Вміст O_2 у витрачаємому паливі:

$$W(S) = \frac{-0.012}{53s^2 + 17s + 1} * e^{-25s}$$

Регулювання рівня води в барабані котла є критично важливим процесом, який здійснюється шляхом зміни ступеня відкриття клапана подачі живильної води. На необхідну кількість подачі цієї води впливають три основні змінні, що постійно змінюються: витрата пари, яка є прямим показником кількості води, що перетворюється на пару і залишає барабан; витрата палива, що корелює з тепловою потужністю котла і, відповідно, зі швидкістю пароутворення; а також витрата води на продувку, яка є об'ємом води, що періодично або безперервно

видаляється з котла для зниження концентрації солей та шламу. Таким чином, система автоматичного регулювання постійно балансує подачу живильної води (рис. 2.2), щоб компенсувати ці витрати та підтримувати рівень води в безпечних та оптимальних межах.

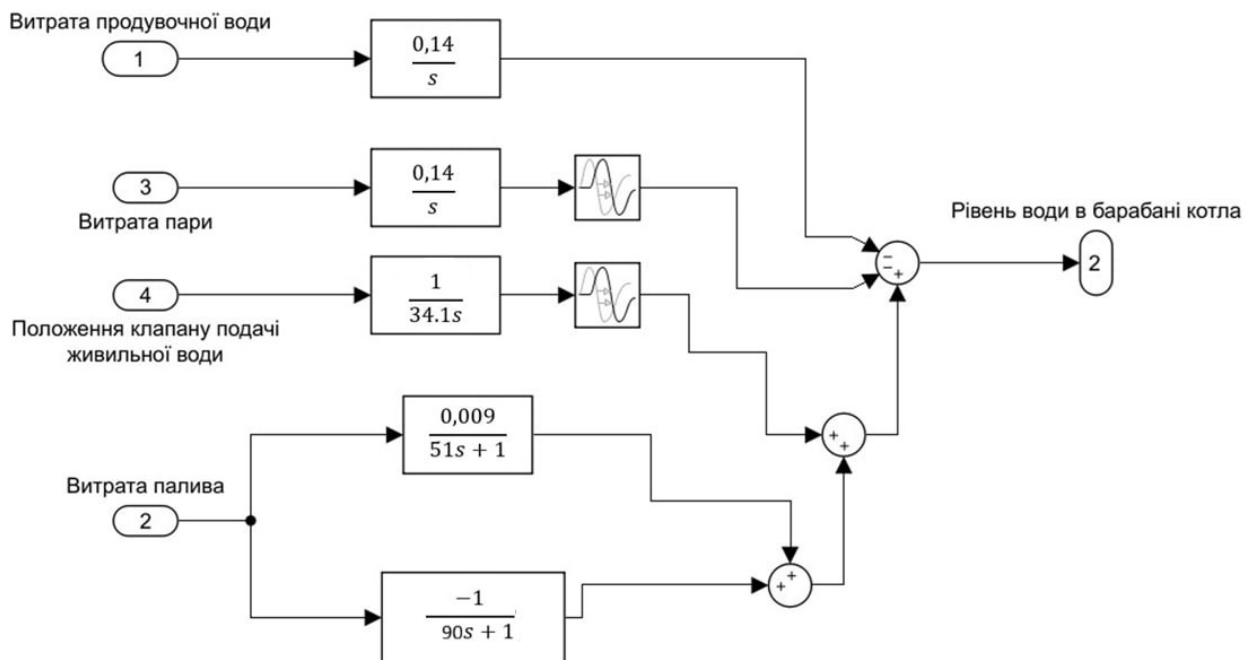


Рисунок 2.2 – Математична модель регулювання рівня води

Передаточні функції, що вказані на схемі:

- Канал подачі живильної води для підтримки рівню води в проходних трубах:

$$W(S) = \frac{1}{34,1s} * e^{-20s}$$

- Канал витрати палива для підтримки рівню води в проходних трубах:

$$W(S) = \frac{0,009}{51s + 1} * \frac{-1}{90s + 1}$$

- Канал витрати пари для підтримки рівню води в барабані:

$$W(S) = \frac{0,14}{s} * e^{-54s}$$

- Канал витрати води на продувку для підтримки рівню води в барабані:

$$W(S) = \frac{1}{3,2s}$$

Зв'язок між тиском пари в паровій магістралі та тепловим навантаженням котла є прямим: тиск пари є ключовим індикатором цього навантаження. Збільшення або зменшення витрати палива безпосередньо впливає на теплосприйняття (кількість тепла, що передається воді), що, своєю чергою, визначає інтенсивність витрати пари з барабана - тобто швидкість генерації пари. Зрештою, будь-яка зміна у швидкості генерації пари (витрата пари) викликає відповідну зміну тиску в паровій магістралі: вища витрата палива призводить до вищої витрати пари та, як правило, до підвищення тиску (за умови, що відбір пари з магістралі залишається незмінним, або регулюється відповідно). Таким чином, тиск пари в магістралі є інтегральним показником балансу між генерацією пари (витратою палива) та її споживанням.

Зміна кількості витраченої пари (або попиту на пару з боку технологічних споживачів) є первинним і найпотужнішим збуренням для системи керування паровим котлом, оскільки цей фактор є зовнішнім і порушує встановлений енергетичний баланс. Раптова зміна попиту на пару миттєво впливає на тиск пари в магістралі: збільшення витрати викликає падіння тиску, а зменшення - його зростання. Для системи регулювання тиску це є прямим сигналом до відповідної зміни подачі палива для відновлення балансу між генерацією тепла і відбором пари. Більше того, це збурення також критично впливає на рівень води в барабані через ефект «розбухання» та «усадки»: падіння тиску при

збільшенні витрати пари призводить до інтенсивного вторинного кипіння (збільшення об'єму парових бульбашок), що тимчасово підвищує видимий рівень води («розбухання»), навіть якщо фактична маса води зменшується. Отже, зміна витрати пари одночасно вимагає корекції як витрати палива, так і складної корекції витрати живильної води (рис. 2.3).

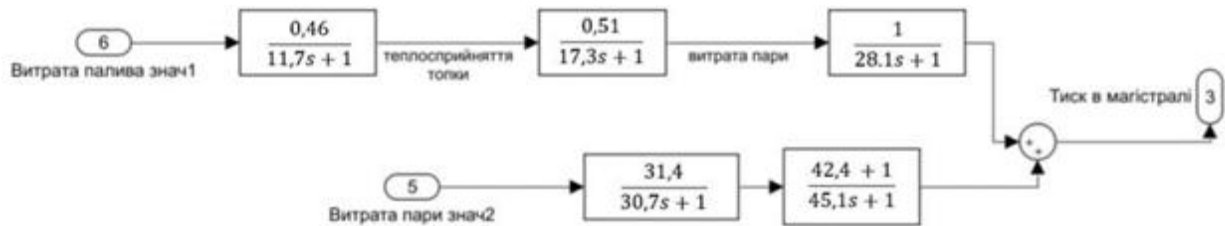


Рисунок 2.3 – Математична модель теплового навантаження

Передаточні функції, що вказані на схемі:

- Канал підтримки тиску в барабані для підтримки рівню тиску в магістралі:

$$W(S) = \frac{1}{28,1s + 1}$$

- Канал витрати пари для підтримки тиску в магістралі:

$$W(S) = \frac{31,4}{30,7s + 1} * \frac{42,4 + 1}{45,1s + 1}$$

- Канал витрати палива для підтримки теплосприйняття топки:

$$W(S) = \frac{0,46}{11,7s + 1}$$

- Канал теплосприйняття в топці для витрати пари з проходних труб:

$$W(S) = \frac{0,51}{17,3s + 1}$$

Витрата неперервної продувки (безперервний злив частини котлової води) є основним засобом контролю за концентрацією розчинених солей (переважно NaCl) та інших домішок у воді барабана (рис. 2.4). Оскільки ці солі не випаровуються разом із парою, їхня концентрація постійно зростає внаслідок випаровування чистої води, що може призвести до солевідкладень та виносу солей з паром. Регулювання цього вмісту солей (солевмісту) відбувається шляхом зміни ступеня відкриття клапана продувочної води, що дозволяє видалити необхідну кількість концентрованої води та замінити її менш концентрованою живильною водою. У контексті моделювання, збурення додається саме для того, щоб імітувати реальні умови експлуатації, коли якість живильної води погіршується або несподівано змінюється, викликаючи збільшення вмісту солей у котловій воді понад норму, і таким чином перевірити здатність системи автоматичного регулювання продувки ефективно протидіяти цьому порушенню і підтримувати солевміст у безпечних межах.

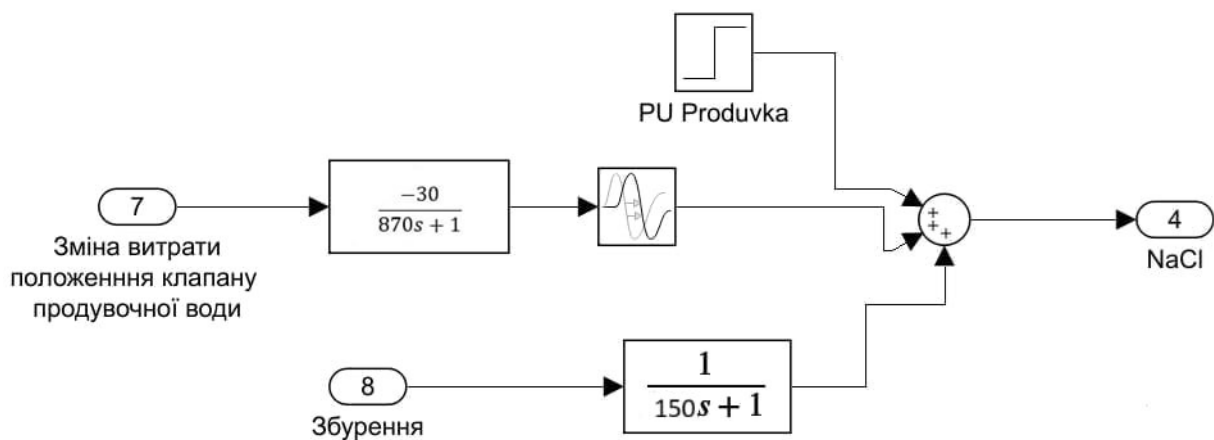


Рисунок 2.4 – Математична модель неперервної продувки

Передаточні функції, що вказані на схемі:

- Канал витрати води на продувку для підтримки низького рівня вмісту солей в проходних трубах:

$$W(S) = \frac{-30}{870s + 1} e^{-120s}$$

Регулювання температури насиченої пари є життєво необхідним для захисту турбін та паропроводів від надмірного теплового навантаження, а також для оптимізації ефективності енергетичного циклу. Цей процес здійснюється шляхом постійної підтримки заданої температури пари на виході з котла (у точці контролю), що є ключовим параметром. Фактичне регулювання відбувається завдяки вприскуванню охолоджуючої (живильної) води у потік насиченої пари за допомогою спеціального пристрою - вприскуючого пароохолоджувача (десупернагрівача). Вода, введена в паропровід у вигляді дрібнодисперсного туману, миттєво випаровується, забираючи при цьому необхідну кількість теплоти у насиченої пари, що призводить до точного зниження та стабілізації її температури. Таким чином, система регулювання контролює положення клапана подачі води до пароохолоджувача (рис. 2.5), щоб компенсувати будь-які відхилення температури, спричинені змінами теплового навантаження або витрати палива.

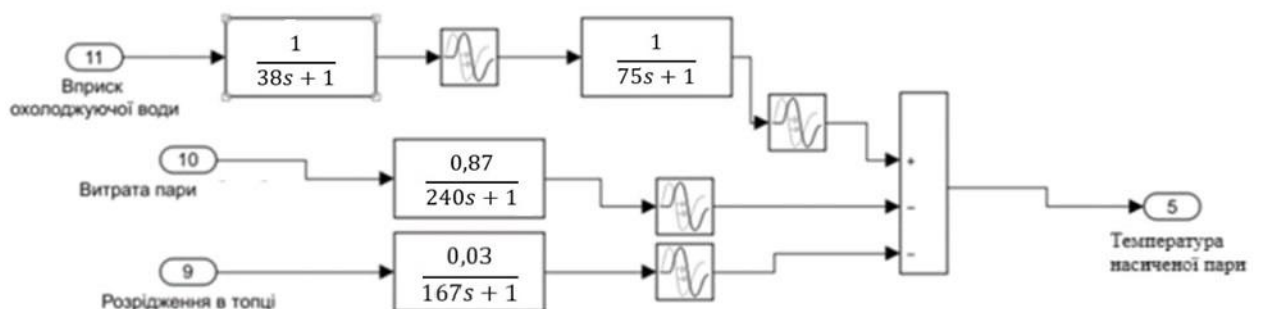


Рисунок 2.5 – Математична модель температури насиченої пари

Передаточні функції, що вказані на схемі:

- Канал розрідження в топці для підтримки температури насиченої пари:

$$W(S) = \frac{1}{75s + 1} e^{-34s}$$

- Канал витрати пару з проходних труб для підтримки температури насиченої пари:

$$W(S) = \frac{0,87}{240s + 1} e^{-63,7s}$$

- Канал витрати води для підтримки температури насиченої пари:

$$W(S) = \frac{1}{38s + 1} e^{-8s}$$

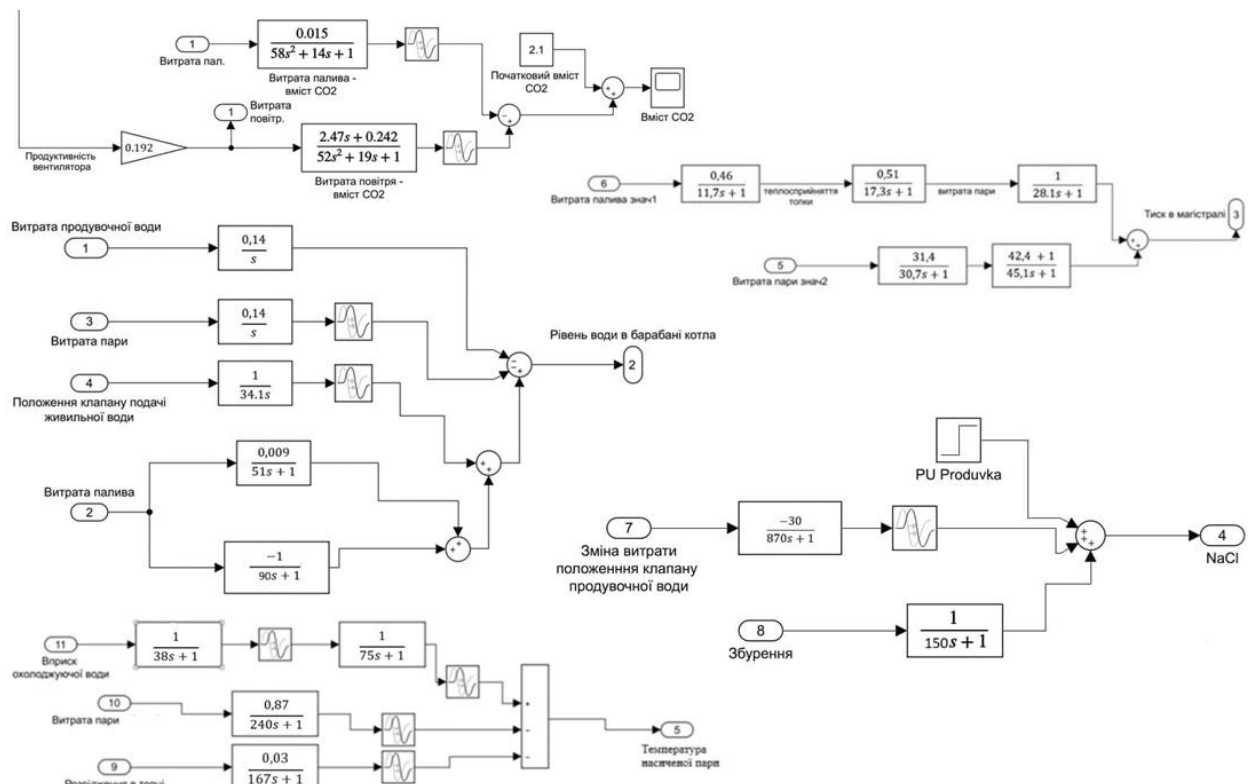


Рисунок 2.6 – Комплексна спрощена модель

Насамперед необхідність розробки комплексної математичної моделі об'єкта керування зумовлена тим, що вона слугує основою для проведення повноцінного імітаційного моделювання процесів регулювання. Завдяки цьому на етапі проектування можна оцінити поведінку котла за різних режимів роботи, перевірити роботу регуляторів, проаналізувати реакцію системи на збурення та оптимізувати параметри алгоритмів керування без втручання у реальний технологічний процес, що значно підвищує безпеку і економічність проектування систем автоматизації. [28]

2.2 Функціональна схема автоматизації парового котла насиченого типу

Функціональна схема автоматизації (ФСА) є ключовим проєктним документом, який слугує детальною візуальною та структурною мапою для впровадження систем керування на промисловому об'єкті (рис. 2.7). Ця схема не просто відображає наявне обладнання, а чітко визначає функціональну структуру системи автоматизації, тобто показує, як саме будуть взаємодіяти між собою всі елементи: датчики, виконавчі механізми (клапани, насоси), регулятори та засоби управління. ФСА детально окреслює обсяг автоматизації, вказуючи, які саме технологічні установки та окремі агрегати (наприклад, насоси, теплообмінники, котли) будуть охоплені автоматичним контролем та керуванням, що є критично важливим для забезпечення безпеки, ефективності та надійності всього виробничого процесу. Ця схема зазвичай є основою для подальшої розробки програмного забезпечення та монтажних робіт. [32]

ФСА представляє собою креслення, яке детально візуалізує функціональну структуру та обсяг автоматизації окремих агрегатів і цілих технологічних установок. На цій схемі, використовуючи стандартизовані схематичні умовні позначення, зображуються всі компоненти, необхідні для контролю та управління процесом:

- Технологічне обладнання: власне установки, які підлягають автоматизації (наприклад, насоси, котли, реактори).
- Комунікації: технологічні лінії, якими рухаються речовини (паропроводи, трубопроводи, магістралі).
- Засоби автоматизації та управління: сюди входять всі інтелектуальні та фізичні елементи системи, зокрема прилади (датчики, вимірювальні пристрої), регулятори, обчислювальні пристрої (контролери, ПЛК) та органи управління (клапани, засувки, виконавчі механізми).

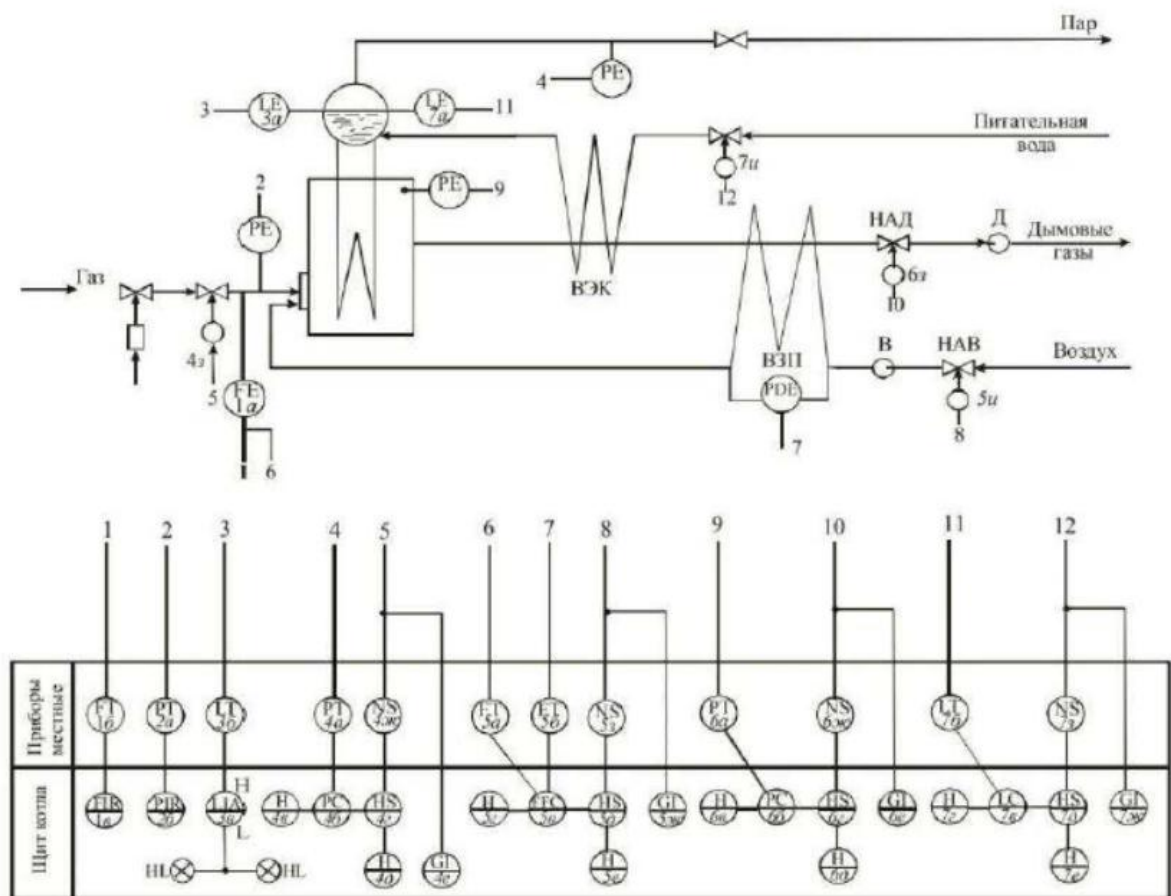


Рисунок 2.7 – Функціональна схема автоматизації парового котла насиченого типу

2.1 Технічні засоби автоматизації

Для отримання достовірної якісної та кількісної інформації про параметри технологічного процесу необхідно обрати відповідний метод і засоби вимірювання. Вибір методу вимірювання та первинного перетворювача визначається конкретними умовами вимірювання (вимірюваним середовищем, його параметрами, особливостями технологічного процесу тощо) та вимогами, що висуваються до точності вимірювання і функцій, які виконуються засобами вимірювання.

Основними критеріями вибору засобів автоматизації є:

- діапазон вимірюваної величини;
- клас точності;
- умови експлуатації.

Відповідно до діапазону вимірювання і ступеня агресивності середовища обирається тип датчика. При виборі перетворювачів необхідно враховувати вид сигналу, що надходить із виходу датчика. Для кожного виду сигналу існує певний вид перетворювача, розрахований на роботу з цим сигналом.

Для моніторингу та контролю температури насиченої пари використовується спеціалізований високотемпературний термометр опору RGTF 2 ID, розроблений компанією S+S Regeltechnik. (рис. 2.8)

- Конструктивні особливості: Датчик має конструкцію для вкручування, що забезпечує його надійну інтеграцію в трубопровід або систему. Він оснащений горловиною та фланцем, які, ймовірно, слугують для полегшення монтажу, ізоляції від високої температури корпусу та герметичності з'єднання;

- Основне призначення: Хоча в цьому випадку він обраний для насиченої пари, його основне застосування - вимірювання екстремально високих температур у газоподібних середовищах. Типові сфери використання включають:

- Контроль температури димових газів (наприклад, у котельних установках чи промислових печах);
 - Моніторинг відпрацьованого (витяжного) повітря у високотемпературних промислових процесах;
- Технічні характеристики:
- Вихідний сигнал: Датчик має пасивний вихід. Це означає, що він не генерує стандартний уніфікований сигнал напруги або струму (як, наприклад, 4-20 мА), а безпосередньо видає зміну свого електричного опору;
 - Діапазон вимірювання: від -100 °С до +750°С. Цей широкий діапазон підтверджує його придатність для роботи у складних промислових умовах з великими коливаннями температури;
- Сумісність: Завдяки використанню стандартних типів термоопорів, датчик RGTF 2 ID гарантує високу універсальність. Його можна легко підключати та інтегрувати до систем автоматизації, які використовують контролери (PLC, DCS, регулятори) практично будь-якого відомого світового виробника.

Конструкція датчиків являє собою П-подібну монтажну головку, відлиту з високоміцного алюмінієвого сплаву. Для швидкого доступу та герметизації кришка корпусу фіксується спеціальними швидкознімними гвинтами. Така конструкція гарантує надійний захист від впливу навколишнього середовища: пристрій відповідає стандарту IP54 і має III клас захисту. Як додаткова опція доступний вищий ступінь захисту – IP65. З корпусу виходить сталеві трубка-сенсоротримач (з високоякісної сталі), всередині якої, у спеціальній горловині, розміщений чутливий вимірювальний елемент.

Для регулювання тиску обрано інтелектуальний датчик для вимірювання абсолютного тиску «ЕМІС-БАР» (рис. 2.9).

Датчики абсолютного тиску вимірюють відносно вакууму. Таке вимірювання забезпечується наявністю спеціальної камери, з якої під час

виготовлення приладу відкачується повітря. Ця камера розташовується з одного боку сенсора, а з іншого на нього впливає тиск вимірюваного середовища. Електронний блок виконує розрахунок і виводить отримане значення на дисплей або передає за допомогою вихідних сигналів.



Рисунок 2.8 – Високотемпературний датчик з горловиною та фланцем
RGTF 2ID

Прилади за специфікацією призначені для експлуатації при температурі вимірюваного середовища від -80°C до $+250^{\circ}\text{C}$, із застосуванням відповідної трубки для зниження температури до $+700^{\circ}\text{C}$. Також широко застосовуються для вимірювання агресивних середовищ. Вихідне , 4-20 мА + HART з наявністю DD. Діапазон вимірюваних тисків до 40 МПа, що дозволяє його застосовувати в нашій установці. Має підвищений ступінь захисту датчиків від впливу пилу та вологи IP65, IP68.



Рисунок 2.9 – Датчик виміру абсолютного тиску

Також у роботі використовується інтелектуальний вихровий витратомір-лічильник ЕМІС-ВИХР 200 (рис. 2.10) зі стабільною роботою при високих температурах та тисках. Висока стабільність роботи забезпечується за рахунок:

- збереження точності вимірювань при зміні параметрів процесу;
- стійкості сенсора до гідроударів;
- відсутності рухомих частин;
- стабільної роботи при високих температурах;

- забезпечення низьких втрат тиску в порівнянні з пристроями, що звужують потік;
- адаптивного налаштування обробки сигналу на базі рядів Фур'є, що знижує вплив вібрації на точність вимірювань;
- контролю достовірності метрологічних характеристик.

Лічильник не вимагає періодичного перекалібрування, а діагностика та заміна вузлів проводиться без демонтажу. Лічильники постачаються лише після проходження обов'язкового проливання на повірочному стенді. Віддалена передача даних, налаштування, перевірка приладів (через RS-485 на базі протоколу Modbus RTU) дозволяють знизити витрати на обслуговування. Лічильник має широкий динамічний діапазон вимірювань; важливою перевагою є наявність конструктивного виконання з конічними переходами.

Висока точність вимірювань дозволяє використовувати вихровий лічильник газу та пари для обліку насиченої та перегрітої пари й повітря.



Рисунок 2.10 – Інтелектуальний вихровий витратомір-лічильник

Тиск вимірюваного середовища 25 МПа, температура вимірюваного середовища від -60°C до $+500^{\circ}\text{C}$. Вихідними сигналами можуть бути:

- аналоговий струмовий 4-20 мА + HART (опціонально);
- імпульсний;
- дискретний - режими "реле витрати" та "дозатор";
- частотний до 1000 Гц;
- цифровий Modbus RTU з інтерфейсом RS-485 та USB.

Для вимірювання та контролю рівня води в барабані використовується сильфонний диференційний манометр показуючий сигналізуючий ДСП-4Сг-М1 (рис. 2.11).

Дифманометр ДСП-4Сг-М1 призначений для вимірювання різниці тисків у рідких та газоподібних середовищах. Крім того, дифманометр ДСП-4Сг-М1 вміє сигналізувати про значення різниці тисків.

Складається дифманометр ДСП-4Сг-М1 із сильфонного диференційно-манометричного блоку, обладнаного торсіонним виводом на стрілочний показчик. Дифманометр ДСП-4Сг-М1 має корпус діаметром 160 мм.



Рисунок 2.11 – Дифманометр

Також використовуються базові клапани BV300 (рис. 2.12) для контролю на різних етапах. Базові клапани використовуються як запірні клапани. Ними можна керувати звичайним способом або ззовні за допомогою вбудованого клапана керування. В якості клапана керування можуть використовуватись електромагнітний соленоїд з ручним керуванням або поплавковий клапан.

Компактна конструкція робить ці пристрої ідеально придатними для застосування в місцях, де вільний простір обмежений, наприклад, у трубопроводах. Вони можуть використовуватися для будь-яких комерційних чи промислових застосувань у рамках своїх технічних характеристик.

Серед переваг:

- висока пропускна здатність;
- мала вага та компактна конструкція;
- внутрішнє і зовнішнє захисне порошкове покриття – застосований порошок не токсичний і фізіологічно безпечний;
- змінне сидло клапана.



Рисунок 2.12 – Запорний клапан BV 300

Засувки в системі регулюються електроприводами AUMA SA (рис. 2.13). Електроприводи для автоматизації промислової арматури AUMA SA. Ступінь захисту IP 68. Захист від корозії до C5 відповідно до EN ISO 12944-2.

Приводи AUMA можуть бути інтегровані в будь-яку звичайну DCS (розподілену систему керування). Вони доступні у конфігурації з блоками керування AMExC або ACExC. Приводи з вбудованими засобами керування готові до роботи відразу після підключення до джерела живлення і можуть управлятися за допомогою місцевого керування.

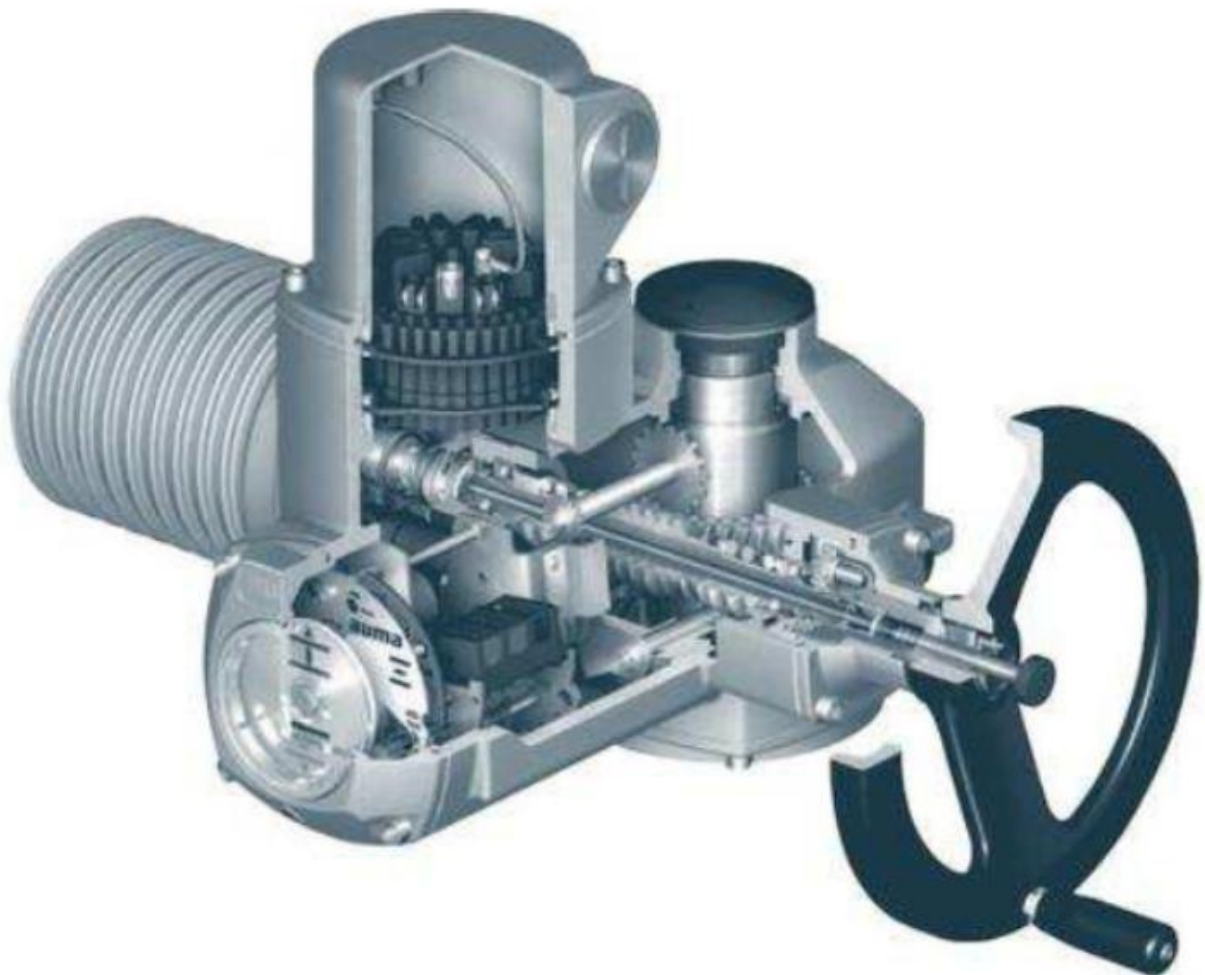


Рисунок 2.13 – Електропривід AUMA SA

До переваг даних електроприводів належить:

- Введення в експлуатацію та діагностика можливі через програмне забезпечення CDT. Зв'язок між цифровими інтерфейсами, ноутбуком та приводом здійснюється на основі з'єднання Bluetooth;
- Встановлення дуже просте. Вставні муфти дозволяють легко адаптувати (з'єднати) привід із клапаном. Електричне підключення здійснюється через роз'єм терміналу;
- Керування з DCS можна здійснювати або за допомогою команд керування «ВІДКРИТИ-СТОП-ЗАКРИТИ», або визначаючи задану позицію. Команди та сигнали зворотного зв'язку передаються або через звичайні паралельні інтерфейси, або через мережеві інтерфейси;
- Електроприводи AUMA підтримують протоколи польових шин.

Висновки за розділом

У другому розділі було здійснено комплексну ідентифікацію математичної моделі парового котла насиченого типу та виконано синтез системи автоматичного керування його основними технологічними параметрами. Результати дослідження дозволили сформулювати цілісне уявлення про динаміку процесів у барабанному котлі, а також визначити вимоги до системи регулювання, що забезпечує стабільне та ефективне отримання насиченої пари.

На основі аналізу об'єкта керування проведено структурування котла як багатопараметричної динамічної системи з вираженими нелінійностями, часовими затримками та взаємозалежністю окремих контурів. Визначено основні входи (подача палива, повітря, води, зовнішні збурення) і виходи (тиск та температура пари, рівень води, теплові та газові баланси), що стали базовими змінними для побудови математичної моделі.

У ході моделювання описано теплові, масообмінні та гідродинамічні процеси, що відбуваються в котлі. Модель враховує найважливіші фізичні залежності, включаючи нелінійну залежність швидкості випаровування від температури, зворотний вплив тиску на теплову продуктивність і зміну складу димових газів при порушенні співвідношення «паливо–повітря».

За допомогою експериментальних та розрахункових даних було виконано ідентифікацію параметрів моделі. Застосовані методи - метод найменших квадратів, оцінка динамічних параметрів за реакцією на збурення, а також моделювання в MATLAB/Simulink - дозволили уточнити коефіцієнти теплових і гідравлічних процесів, адаптувати модель до реальних умов роботи котла та перевірити її адекватність. Проведений аналіз похибок підтвердив достатню точність моделі для використання в задачах синтезу керування.

На основі отриманої моделі здійснено синтез системи автоматичного керування. Розглянуто декілька структур і вибрано оптимальну з точки зору стійкості, швидкодії та енергоефективності. Виконано налаштування регуляторів для ключових контурів: тиску пари, рівня води, подачі палива та повітря, а також оптимізації процесу горіння на основі контролю складу димових газів. Досліджено можливість застосування сучасних алгоритмів (адаптивного та предиктивного регулювання), що показали покращені характеристики у порівнянні з класичними ПІД-регуляторами.

Моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB/Simulink підтвердило, що розроблена система керування здатна забезпечити стабільність параметрів котла при зміні навантаження, компенсувати збурення та зменшити динамічні відхилення.

Отже, у розділі сформовано повний комплекс математичних та інженерних рішень, необхідних для переходу до програмно-технічної реалізації системи автоматичного керування. Результати моделювання та синтезу створюють основу для впровадження високоточної, надійної та енергоефективної системи керування паровим котлом, що розглядатиметься в наступному розділі.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

3.1 Функціональна структура автоматизованої системи управління

3.1.1 Контроль основних параметрів технологічного процесу

Ефективна робота автоматизованої системи управління паровим котлом насиченого типу неможлива без безперервного контролю ключових технологічних параметрів, що визначають стабільність, безпеку та економічність процесу пароутворення. Кожен параметр має свій фізичний зміст, впливає на теплотехнічний баланс котла та характеризує стан окремих підсистем - топкової, водогрійної, парогенераційної та газовідвідної. Для забезпечення високої точності керування необхідно використовувати системний підхід до моніторингу, який передбачає установку відповідних датчиків, організацію каналів збору даних, формування діагностичних сигналів та реалізацію алгоритмів аварійного реагування. У таблиці нижче наведені основні параметри, що підлягають контролю в автоматизованій системі керування котлом насиченої пари, а також їх функціональне призначення та вплив на технологічний процес. (табл. 3.1)

Таблиця 3.1 – Основні параметри до контролю технологічного процесу

Параметр	Номинальне значення	Нижній рівень	Верхній рівень
<i>Витрата палива</i>	230 м ³ /год	Витратомір	Сигнал від ПЛК;
<i>Концентрація кисню</i>	0.2 %	Газоаналізатор	Сигнал від ПЛК;
<i>Тиск палива в трубопроводі</i>	1 МПа	Датчик тиску	Сигнал від ПЛК;

<i>Рієнь води в котлі</i>	45 мм	Рівнемір	Сигнал від ПЛК;
<i>Температура живильної води</i>	102 °C	Датчик температури	Сигнал від ПЛК;
<i>Температура насиченої пари</i>	197 °C	Датчик температури	Сигнал від ПЛК;

3.1.2 Функції регулювання

1. Автоматична система регулювання розрідження в топці котла

Регулювання розрідження у топковому просторі є важливим елементом стабільної та безпечної роботи котла насиченої пари. Значення розрідження визначає інтенсивність відведення димових газів та якість процесу горіння. Надто велике розрідження призводить до надмірного підсмоктування повітря та збільшення тепловтрат, а надто мале - до нестабільного горіння й ризику прориву полум'я.

Автоматична система регулювання забезпечує підтримання заданого рівня розрідження шляхом керування продуктивністю димососу. Продуктивність вентилятора-димососу визначається залежно від показників тиску в топці: система безперервно порівнює фактичне значення з уставкою і змінює швидкість обертання електродвигуна через перетворювач частоти. Використання частотного регулювання дозволяє підвищити точність керування, зменшити енергоспоживання та покращити умови згоряння палива.

2. Автоматична система регулювання температури насиченої пари

Регулювання температури насиченої пари здійснюється насамперед шляхом контролю процесів горіння: подачі палива та повітря. Зміна інтенсивності горіння впливає на теплове навантаження котла, а відтак - на кількість і параметри виробленої пари. При підвищенні потреби в парі система збільшує подачу палива та коригує подачу повітря, забезпечуючи оптимальне співвідношення для повного згоряння. При зниженні навантаження - відповідно зменшує теплову подачу.

Також важливим елементом регулювання є контроль витрати живильної води: швидке надходження більшої кількості води може тимчасово знизити температуру та тиск, тоді як зменшення подачі води - підвищити. Тому контур регулювання тиску (і відповідно температури насиченої пари) є взаємопов'язаним з контуром підтримання рівня води в барабані.

3. Автоматична система регулювання неперервної продувки

Підтримання оптимальної якості води в барабані котла є критично важливим для запобігання відкладенням солей, утворенню накипу та погіршенню тепловідведення. У процесі роботи котла мінеральні солі, що містяться у воді, накопичуються в барабані через випаровування. Це підвищує солевміст і електропровідність котлової води.

Неперервна продувка забезпечує контроль цього процесу шляхом часткового відведення концентрованої води з барабана та заміщення її підживлювальною водою з хімоводоочистки, яка має істотно нижчий вміст мінеральних речовин. Автоматична система регулювання продувки працює за показниками концентрації солей (переважно за вимірюною електропровідністю). Коли значення перевищує допустиму межу, регулятор збільшує відкриття продувочного клапана; при зниженні концентрації - зменшує.

3.1.3 Функції сигналізації при контролі основних параметрів технологічного процесу

У процесі роботи парового котла насиченого типу надзвичайно важливим елементом системи автоматизації є своєчасна та достовірна сигналізація про відхилення технологічних параметрів від встановлених норм. Сигналізація виконує попереджувальну, інформаційну та аварійну функції, забезпечуючи оперативне реагування персоналу та автоматичної системи на потенційно небезпечні ситуації. Вона дозволяє запобігти аваріям, пошкодженню обладнання, погіршенню якості пари та економічним втратам. Кожен сигнал

формується на основі заданих порогових значень параметрів - температури, тиску, рівня води, якості живильної води, розрідження в топці, складу димових газів тощо. У таблиці нижче наведено основні функції сигналізації для різних контрольованих параметрів та їх значення для безпечної та ефективної роботи котельної установки. (табл. 3.2)

Таблиця 3.2 – Функції сигналізації основних параметрів технологічного процесу

Параметр	Номінальне значення	Допустиме відхилення
<i>Тиск палива в трубопроводі</i>	230 мЗ/год	±3%
<i>Рівень води у барабані</i>	0.2 %	±5%
<i>Тиск насиченої пари на виході</i>	1 МПа	±3%
<i>Температура насиченої пари</i>	45 мм	±3%
<i>Концентрація кисню</i>	102 °С	±3%

3.1.4 Блокування та захист технологічного процесу за основними параметрами

I. Регулювання при виході розрідження за допустимі межі

Коли величина розрідження відхиляється від встановлених робочих меж вмикаються корекційні заходи для відновлення балансу горіння:

1. Приведення в норму розрідження:

- Необхідно збільшити оберти вентилятора димовидалення, щоб інтенсивніше відводити продукти згоряння з топкового простору. Це допоможе знизити надмірний тиск або відновити необхідне негативне розрідження.

2. Корекція паливоподачі та повітря:

- Паралельно необхідно зменшити подачу природного газу та повітря до топки. Це знижує загальну теплову потужність та обсяг продуктів згоряння, що також сприяє стабілізації тиску/розрідження в топці та підтримує оптимальне співвідношення "паливо-повітря" для ефективного горіння.

II. Захист та блокування по рівню води в барабані

Рівень води в паровому барабані є критичним параметром. Його значні відхилення можуть призвести до серйозної аварії.

1. Заходи при зменшенні рівня води нижче критичного:

- Якщо рівень води опускається нижче мінімально допустимої позначки, виникає загроза оголення та перегріву екранних труб.
- Необхідно поступово перекрити усі можливі контури зливу води з барабану. Це включає запірну арматуру на лініях продування, імпульсного продування, а також будь-які інші дренажні або зливні лінії, що можуть спричиняти втрату води. Мета - максимально швидко зупинити втрати та відновити нормальний рівень за допомогою живильного насоса.

2. Заходи при збільшенні рівня води вище критичного

- Якщо рівень води піднімається вище максимально допустимої позначки, існує ризик закидання води в паропровід та гідравлічного удару.
- Необхідно поступово відкрити усі можливі контури зливу води з барабану. Це можуть бути лінії постійного або періодичного продування. Мета - безпечно скинути надлишок води з барабана, щоб уникнути перекидання води в парову турбіну. Важливо, щоб це відбувалося поступово для уникнення різких коливань тиску та температури.

3.2 Розробка програмної частини системи керування

Загальна структура програми контролера, за допомогою якої було реалізовано систему керування, була виконана на мові програмування FBD (Function Block Diagram) та складається з 6 блоків на кожний контур керування.

Стан системи котлоагрегата моделюється через набір змінних, що використовуються в програмному забезпеченні. Для реалізації алгоритмів керування в поточному дослідженні було обрано контролер Phoenix Contact. Однак, розроблений імітаційний стенд є гнучким, дозволяючи іншим

користувачам у майбутньому інтегрувати та тестувати власні алгоритми регулювання на обладнанні від інших виробників. Для забезпечення обміну даними між контролером і моделлю необхідно налаштувати зв'язок за технологією OPC у програмному забезпеченні контролера.

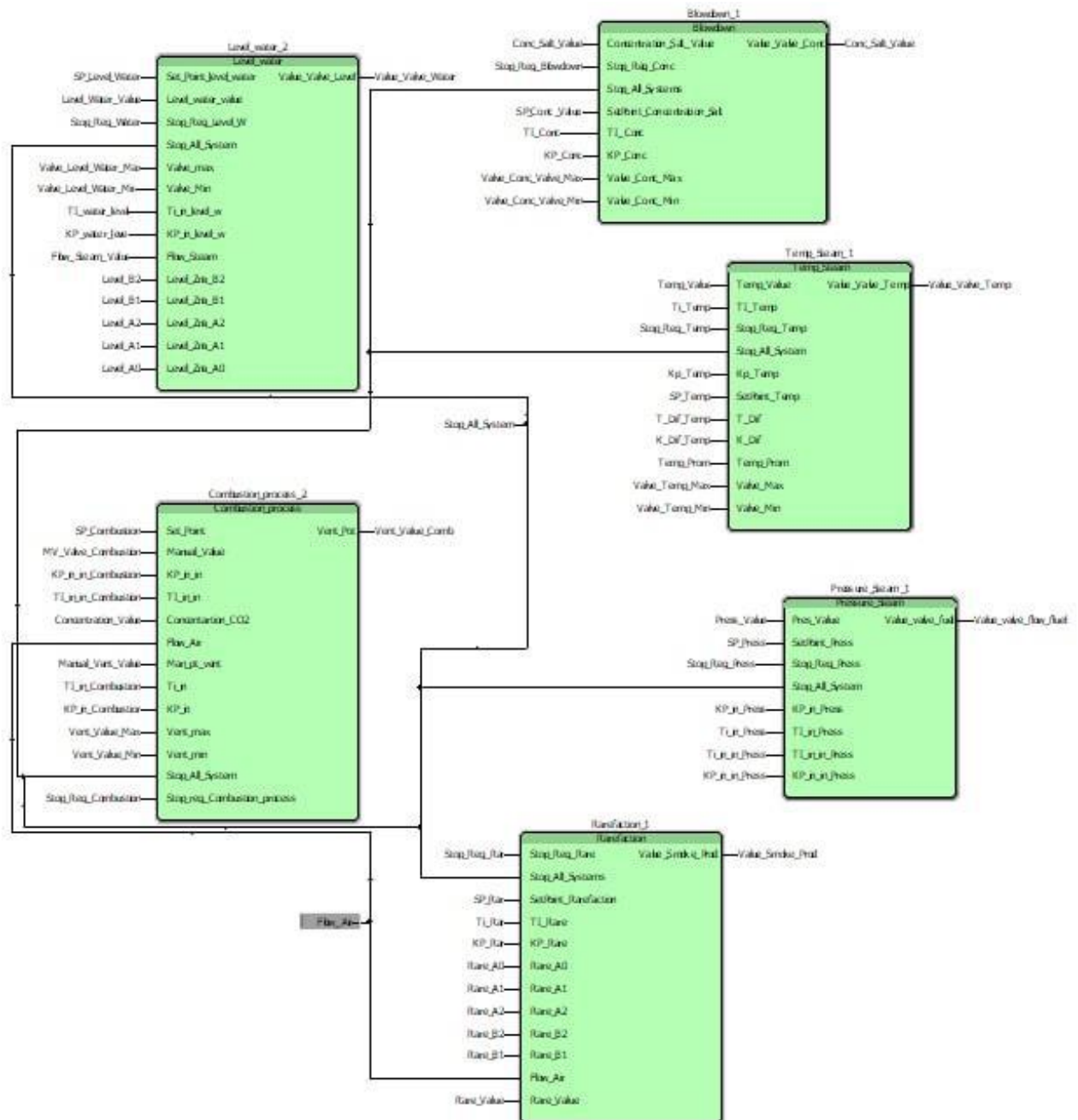


Рисунок 3.1 – Програма для системи керування котлом

3.2.1 Автоматична система керування економічністю витрати палива під час процесу горіння

Для автоматичного підтримання оптимального вмісту кисню у димових газах використовується каскадна схема регулювання.

У цій схемі:

- 1) Зовнішній (головний) регулятор отримує інформацію про концентрацію вуглекислого газу (сигнал Concentration_CO2);
- 2) На основі різниці між цим поточним значенням CO² та заданим бажаним значенням (сигнал Set_point), зовнішній регулятор генерує керуючий сигнал;
- 3) Цей керуючий сигнал стає завданням для внутрішнього регулятора, який безпосередньо впливає на процес.

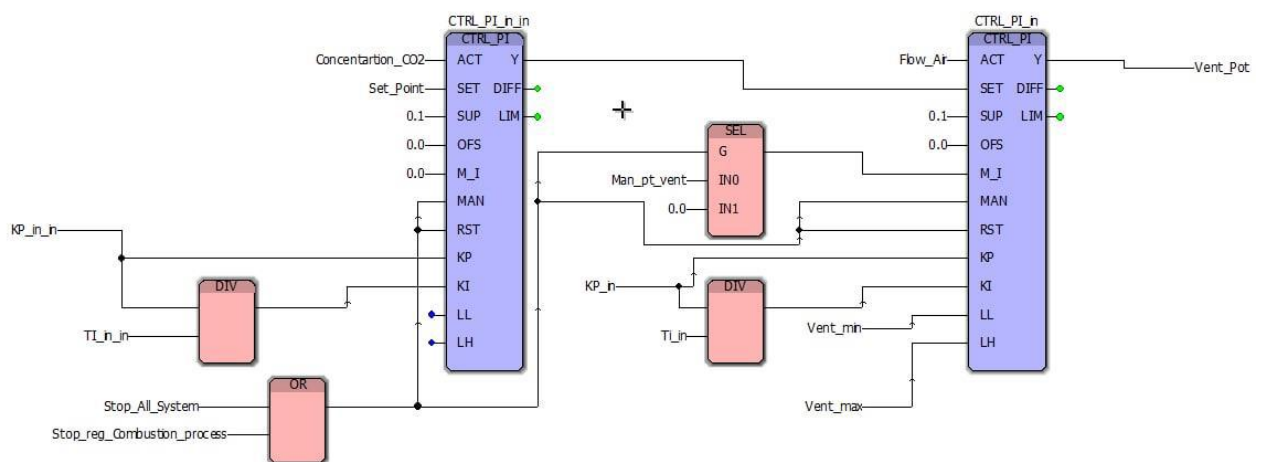


Рисунок 3.2 – Схема керування економічністю горіння

У випадку виникнення аварії в роботі котельного обладнання або при необхідності припинити процес регулювання в горіння, на виходи обох регуляторів подаються нульові керуючі сигнали.

Це може відбуватися за допомогою:

- сигналу повної зупинки системи (Stop_all_system);

- сигналу зупинки регулювання лише процесу горіння (Stop_reg_Combustion_process).

Результатом в обох випадках є те, що вихідні сигнали обох контролерів стають рівними нулю.

3.2.2 Автоматична система керування підживленням котла водою

Автоматична система регулювання рівня води в барабані котла працює за комбінованою схемою, що дозволяє їй ефективно підтримувати рівень на заданому значенні (Set_point_level_water). Для цього регулятор отримує не лише інформацію про поточний рівень води (level_water_value), але й важливий додатковий сигнал, який виступає компенсатором збурення, а саме - про витрату пари з барабана (Fbw_steam). Враховуючи відхилення поточного рівня від цільового та швидкість втрати пари, регулятор оперативно формує керуючий сигнал (Value_Valve_Level), який безпосередньо контролює подачу живильної води для забезпечення стабільної роботи агрегату.

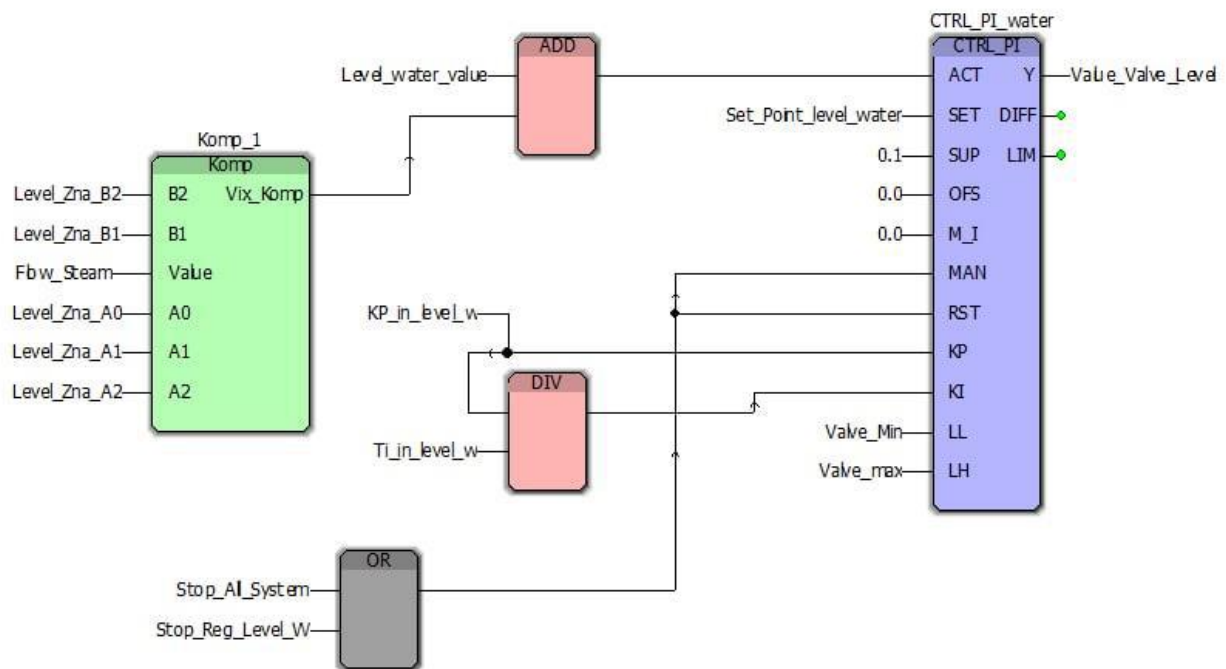


Рисунок 3.3 – Схема керування підживленням водою

Пристрій, що керує живленням котла водою, автоматично припиняє подачу живильної рідини шляхом закриття відповідного клапана щоразу, коли фіксується повна зупинка роботи котлового агрегату (Stop_all_system) або вимикається лише контур регулювання рівня води (Stop_Reg_Level_W). Водночас, у випадку, якщо рівень рідини у барабані перевищує встановлену верхню межу (сигнал Valve_max), контролер ініціює захисну дію, надсилаючи команду на відкриття клапана аварійного спуску води (сигнал Valve_min).

Для опису цієї логіки управління, використовуються функціональні модулі, які забезпечують реалізацію передаточної функції:

$$W(s) = \frac{A_2 s^2 + A_1 s + A_0}{B_2 s^2 + B_1 s}$$

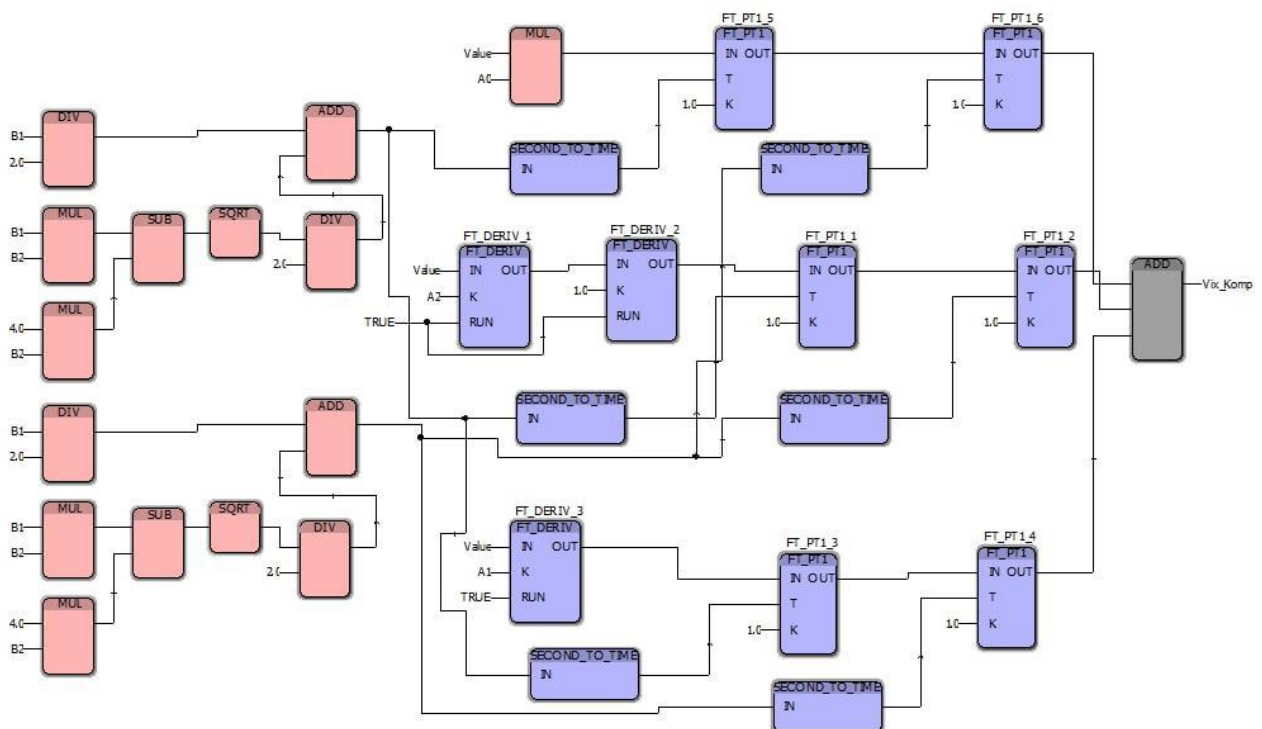


Рисунок 3.4 – Компенсатор збуджень

3.2.3 Автоматична система керування продувкою котла

Керування витратою води під час продувки здійснюється використовуючи одноконтурну схему.

В автоматичному режимі система регулювання працює наступним чином: коли фактичний вміст солей у воді (сигнал `Concentration_Salt_Value`) відхиляється від встановленого цільового рівня (сигнал `SetPoint_Concentration_Salt`), контролер генерує команду (`Value_Valve_Conc`), яка керує виконавчим механізмом.

Як і в інших подібних контурах управління, робота цієї системи регулювання концентрації солей є умовною і може бути негайно припинена. Процес регулювання автоматично зупиниться, як тільки надійде будь-який із двох окремих сигналів аварійної зупинки. Це може бути або загальний сигнал про повне вимкнення всієї системи (`Stop_all_system`), або спеціалізована команда на зупинку лише даного контуру регулювання концентрації (`Stop_Reg_Conc`). Ця умова забезпечує безпеку та можливість швидкого реагування на позаштатні ситуації.

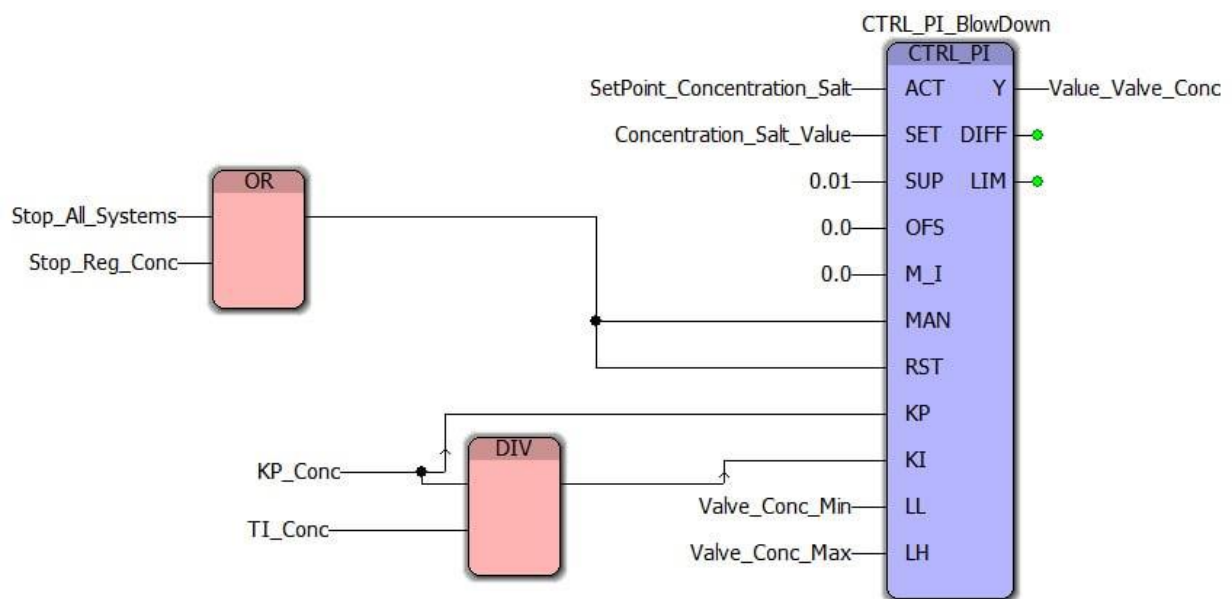


Рисунок 3.5 – Керування продувкою котла

3.2.4 Автоматична система керування тепловим навантаженням насиченою парою

Параметр керується за каскадним принципом. Її робота базується на використанні тиску пари в барабані як випереджаючого сигналу та тиску пари в магістралі як інерційного.

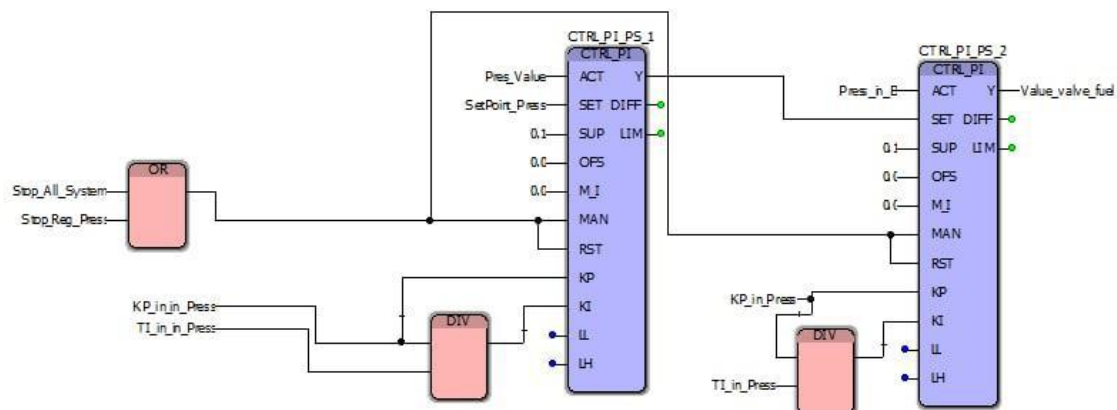


Рисунок 3.6 – Керування тепловим навантаженням пару

На коригуючий регулятор надходять два основні сигнали: поточне значення тиску пари в магістралі (сигнал Press_Value) та задане значення тиску (сигнал SetPoint_Press).

Якщо поточний тиск пари відхиляється від заданого значення, коригуючий регулятор генерує керуючий сигнал. Цей сигнал подається як завдання на стабілізуючий регулятор, який додатково отримує інформацію про тиск пари в барабані (сигнал Press_in_B).

У свою чергу, при відхиленні сигналів внутрішній регулятор формує сигнал керування (Value_valve_fuel), який визначає необхідне положення заслінки подачі газу (палива).

Для зупинки процесу регулювання використовуються два окремі сигнали: Stop_all_system для аварійної зупинки та Stop_reg_Press для планової зупинки.

Регулятор системи керування температурою пари отримує три вхідні сигнали: поточне значення температури пари (Temp_value), задане значення температури (SetPoint_Temp) та вихідний сигнал від диференціатора. Сам диференціатор, у свою чергу, отримує на вхід поточне значення температури в проміжній точці (Temp_Prom). Виходом регулятора є положення клапана впорскування води (Value_Valve_Temp), яке визначає, наскільки його потрібно відкрити.

3.3 Моделювання та аналіз автоматизованої системи керування

Перевірка автоматизованих систем управління технологічними процесами необхідна для гарантії їхньої коректної роботи в цілому. Особлива увага приділяється моделюванню технологічного об'єкта управління, при цьому супервізорний рівень (системи диспетчеризації тощо) може бути не реалізований у повному обсязі.

Імітаційне моделювання є доцільним, коли складно провести повний комплекс випробувань на реальному об'єкті, а також використовується для навчання. Розрізняють два основні методи імітаційного моделювання: Hardware-in-the-loop (HIL) та Software-in-the-loop (SIL). Вони відрізняються технічною складовою для виконання завдань, запрограмованих у контролері. У полігоні HIL використовується реальний програмований логічний контролер (ПЛК), тоді як у SIL застосовується програмно реалізований контролер (реальний софт-ПЛК або програмний симулятор хард-ПЛК).

Такий підхід в результаті дозволяє:

- Зменшити час проведення пусконаладжувальних робіт;
- Діагностувати помилки в алгоритмах роботи ще до фактичного запуску на реальному об'єкті;
- Знизити ризики виникнення аварійних ситуацій під час випробувань АСУ ТП.

3.3.1 Автоматична система керування живлення водою

Ця система, яка показує як відбуваються перехідні процеси в системі, яка регулює рівень води в барабані, була розроблена на основі принципу, який був розглянутий в п.2.1,. Крім того, на рисунку 3.8 можна побачити, як система відпрацьовує свою функцію в момент, коли змінюється задане значення.

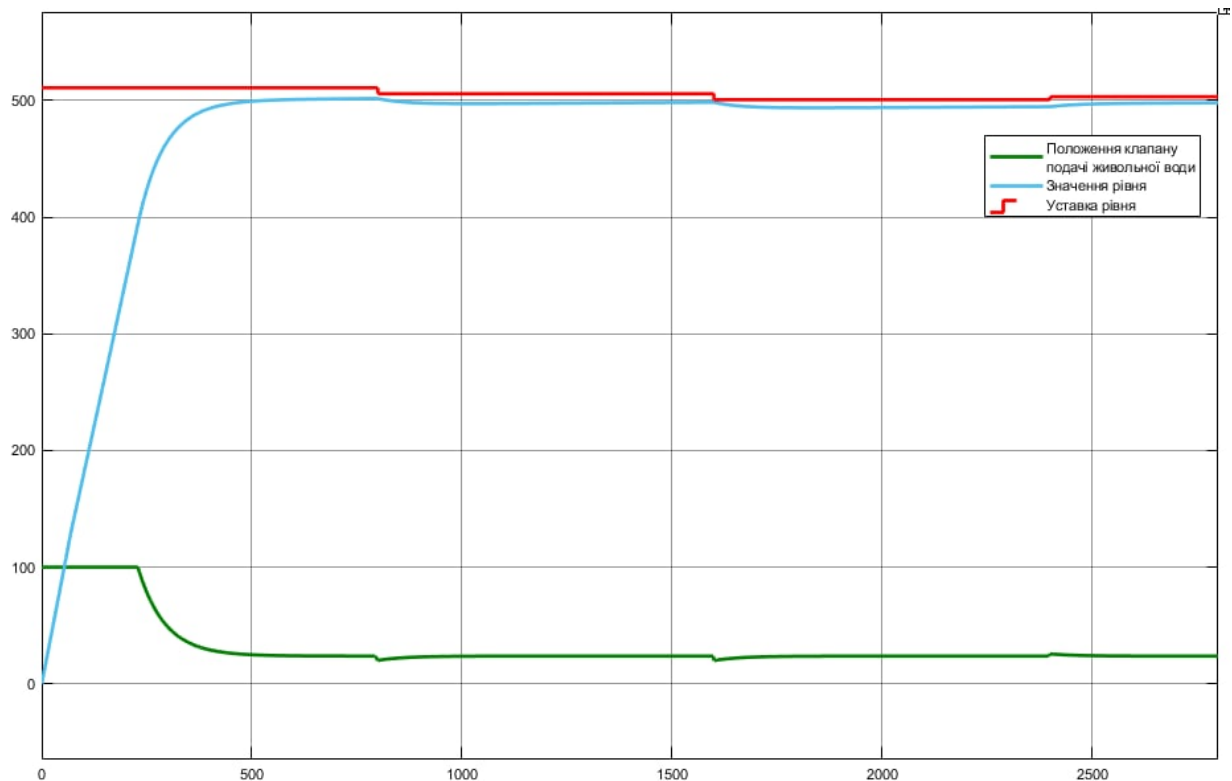


Рисунок 3.8 – Перехідні процеси в системі підживлення котла

Система демонструє високу якість регулювання. Графік підтверджує, що автоматична система:

- Забезпечує швидке встановлення необхідного рівня води (малий час регулювання).
- Ефективно відпрацьовує зміну заданого значення, мінімізуючи відхилення рівня.
- Надійно підтримує рівень води в стаціонарному режимі, що запобігає як оголенню нагрівних поверхонь (небезпечно низький рівень), так і виносу вологи в паропровід (небезпечно високий рівень).

3.3.1 Автоматична система керування безперервною продувкою

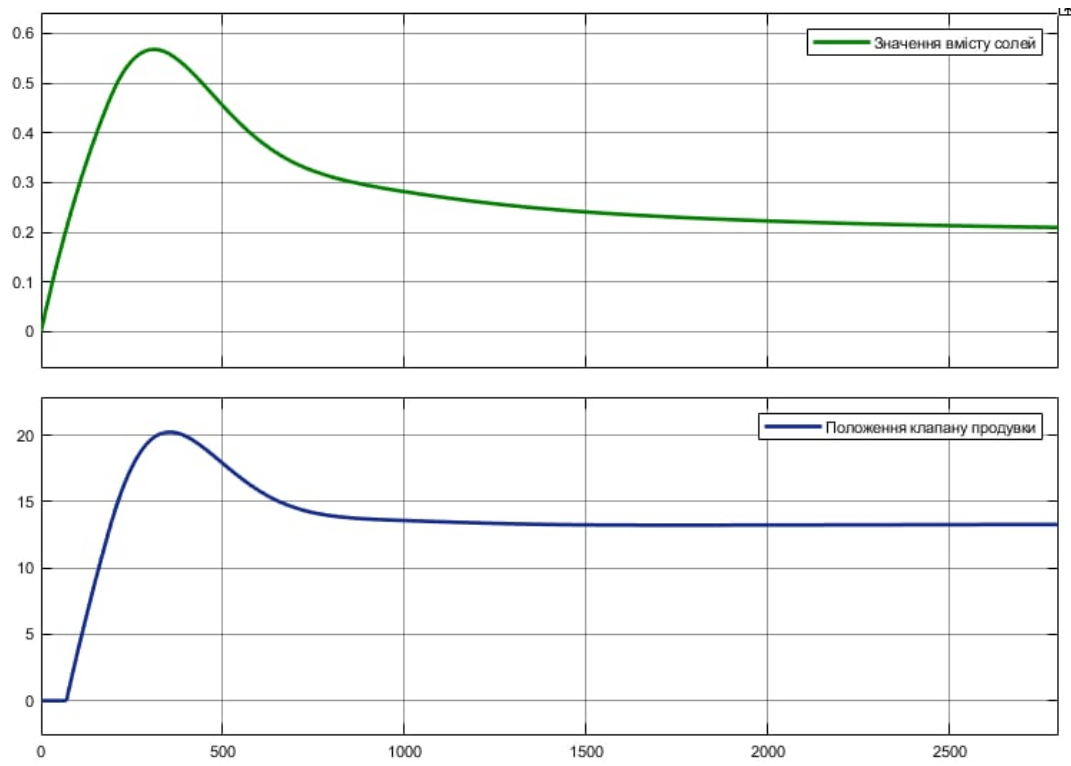


Рисунок 3.9 – Перехідні процеси в системі продувки котла

Регулювання концентрації солей у воді барабану котла - це тривалий процес, оскільки об'єм барабану значно перевищує пропускну здатність клапана безперервної продувки.

3.3.2 Автоматична система керування тепловим навантаженням насиченої пари

На рисунку 3.10, представлено візуальне відображення двох ключових перехідних процесів, що виникають під час регулювання теплового навантаження системи. Це регулювання здійснюється за допомогою каскадної схеми управління, яка передбачає використання випереджаючого сигналу.

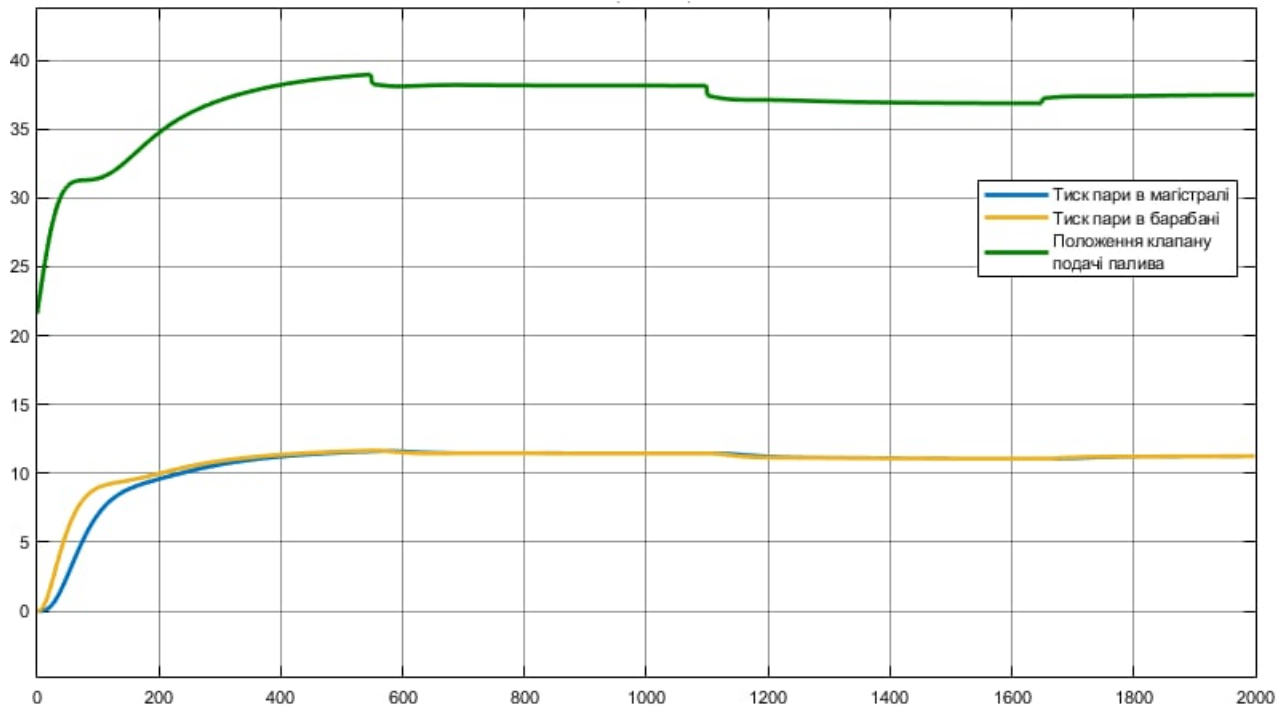


Рисунок 3.10 – Перехідні процеси в системі керування тепловим навантаженням

У цьому конкретному випадку, тиск пари в барабані використовується як випереджаючий сигнал. Це означає, що зміна або відхилення цього тиску подається на вхід внутрішнього (вторинного) контуру регулятора, що керує тепловим навантаженням. Таке каскадне управління дозволяє швидше та точніше реагувати на збурення, оскільки сигнал, що відображає стан основного об'єкта, надходить раніше, ніж відхилення почне сильно впливати на вихідний параметр.

3.3.3 Автоматична система керування розрідженням в топці

Регулювання розрідження в топці котла характеризується наявністю коливальних переходних процесів. Ця динамічна поведінка, яка включає осциляції, виникає через те, наскільки швидко відбувається зміна фактичного розрідження у відповідь на коригування потужності димососа.

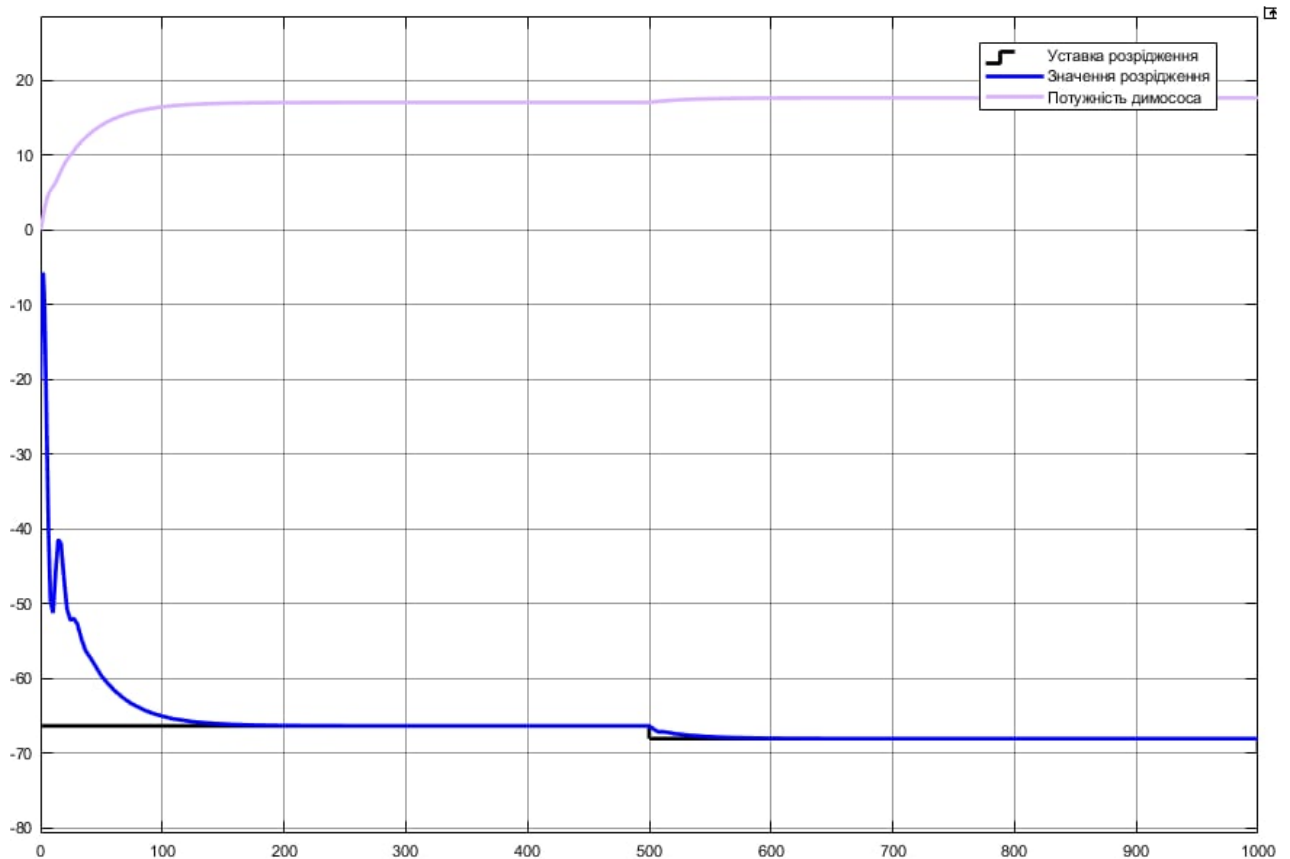


Рисунок 3.11 – Перехідні процеси в системі керування розрідженням в топці

Основна функція системи автоматичного керування розрідженням полягає у забезпеченні двох ключових цілей:

- Досягнення заданого значення уставки: Система має вивести й утримувати розрідження на рівні, встановленому оператором або вищим рівнем автоматики.
- Компенсація зовнішніх збурень: Вона повинна ефективно протидіяти негативному впливу факторів, що можуть порушити стабільність розрідження.

3.3.3 Автоматична система керування економічним горінням палива в котлі

На рисунку 3.11 зображено перехідний процес системи керування економічним горінням палива згідно пункту 2.1

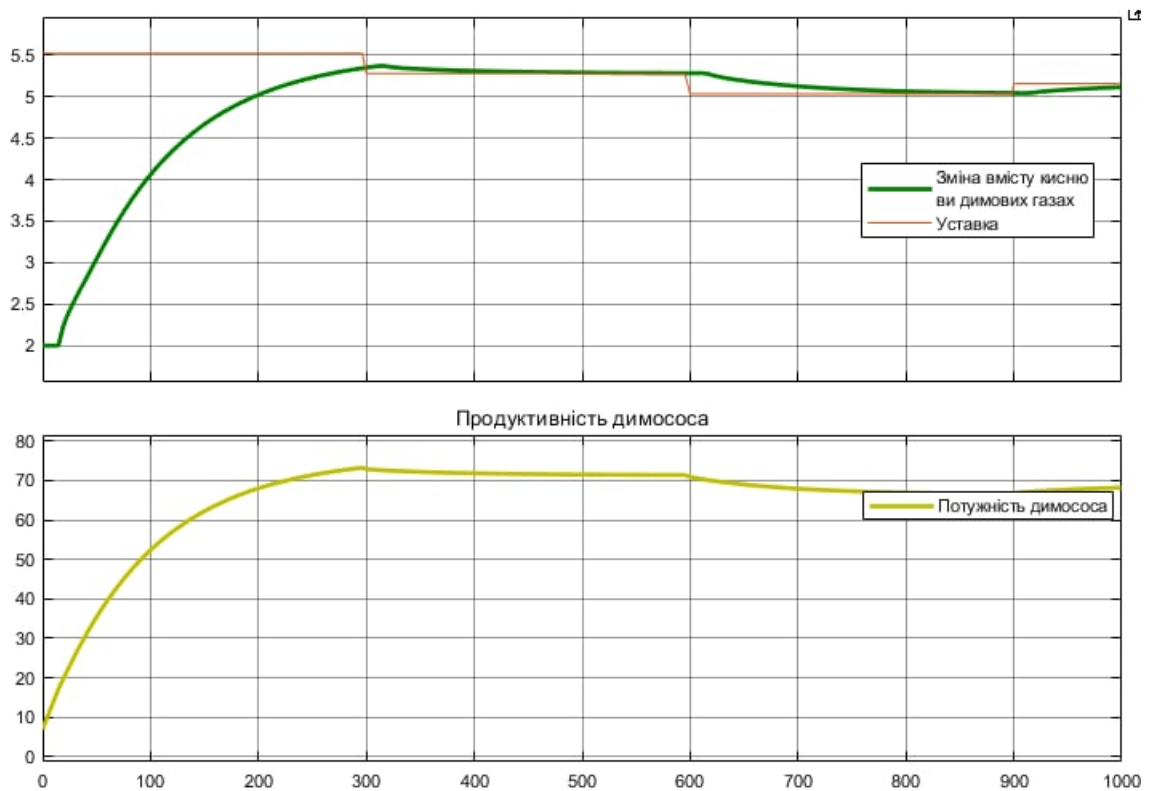


Рисунок 3.12 – Перехідні процеси в системі керування економічним використанням палива

3.3.3 Автоматична система керування температури насиченого пару

На рисунку 3.13 представлено теоретичний перехідний процес у спеціалізованій автоматизованій системі. Ця система призначена для регулювання температури насиченої пари.

Графік демонструє, як з часом змінюються дві ключові температури в цьому процесі:

- Температура насиченої пари в магістралі (основному паропроводі), яка є регульованою величиною і має підтримуватися на заданому рівні;
- Температура пари в проміжній точці, яка, ймовірно, є вимірювальною точкою до повного завершення процесу насичення або використовується для попереднього керування чи оцінки стану системи.

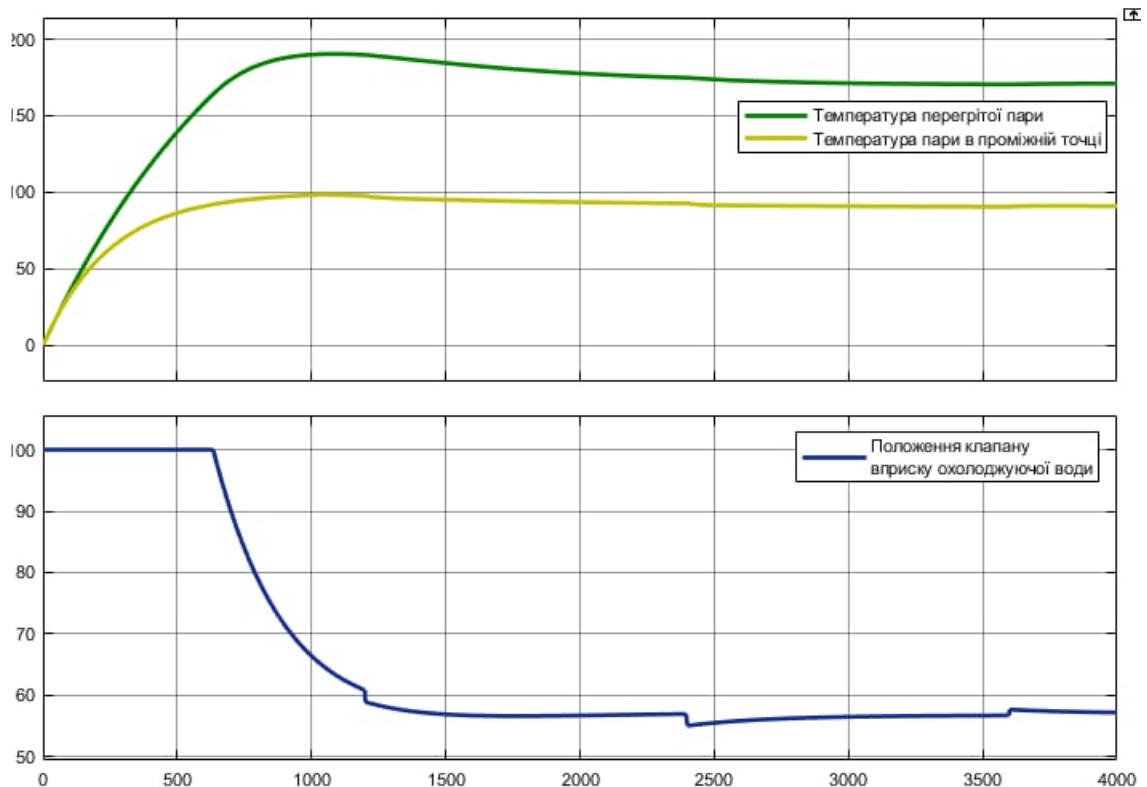


Рисунок 3.13 – Перехідні процеси в системі керування температурою насиченим паром

Система демонструє задовільну якість регулювання з точки зору часу регулювання, оскільки процес займає близько 2000-2500 секунд, після чого встановлюється новий баланс. Однак, наявне перерегулювання температури насиченої пари свідчить про необхідність додаткового налаштування параметрів регулятора для зменшення максимального відхилення та забезпечення більш гладкого перехідного процесу.

Висновки за розділом

У третьому розділі було розглянуто та обґрунтовано комплексну програмно-технічну реалізацію автоматизованої системи керування паровим котлом насиченого типу, що забезпечує стабільну, ефективну та безпечну роботу котельного обладнання на харчовому підприємстві. На основі аналізу

технологічного процесу сформовано функціональну структуру системи автоматизації, яка охоплює підсистеми контролю основних параметрів, регулювання, сигналізації та захисту.

Було визначено ключові технологічні параметри, що потребують постійного моніторингу: тиск і температура насиченої пари, рівень води в барабані, розрідження в топці, витрати палива та повітря, якість котлової води, а також параметри димових газів. Для кожного з них сформовано відповідні функції контролю, що забезпечують оперативне отримання достовірної інформації та можливість коректної реакції системи.

У підпункті, присвяченому функціям регулювання, докладно охарактеризовано роботу контурів стабілізації найважливіших параметрів, включаючи системи підтримання розрідження, регулювання тиску та параметрів насиченої пари, а також системи неперервної продувки. Показано, що застосування частотних перетворювачів, сучасних датчиків та адаптивних алгоритмів дозволяє підвищити точність і динамічність керування.

Окрема увага була приділена функціям сигналізації, які забезпечують раннє виявлення відхилень процесу та інформування оператора про потенційно небезпечні режими. Було обґрунтовано необхідність використання багаторівневої системи сигналів - попереджувальних, тривожних та аварійних - для підвищення безпеки експлуатації котла. Приділено увагу також підсистемам блокувань і технологічного захисту, що гарантують автоматичне виведення котла в безпечний стан у разі критичних відхилень параметрів.

У рамках програмної частини розроблено логічну структуру алгоритмів керування, включаючи регулятори економічності процесу горіння, системи підживлення котла водою та автоматизацію процесу продувки. Показано, що використання сучасних ПЛК, SCADA-систем та модульних засобів збору даних дозволяє створити гнучку, масштабовану та надійну систему керування, що відповідає вимогам харчової промисловості.

Узагальнюючи результати розділу, можна стверджувати, що впровадження розробленої програмно-технічної системи дозволяє істотно

підвищити ефективність роботи котла, зменшити витрати палива, підвищити рівень безпеки та автоматизувати ключові операції, що раніше потребували значного втручання персоналу. Розроблена система відповідає сучасним вимогам енергоефективності, надійності та технологічної безпеки та може бути інтегрована у виробничий комплекс харчового підприємства.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було проведено комплексне дослідження процесів роботи парового котла насиченого типу та розроблено автоматизовану систему керування його технологічними параметрами для застосування на харчовому підприємстві. Мета роботи - підвищення енергоефективності, надійності та безпеки експлуатації котельного обладнання - була повністю досягнута.

У першому розділі здійснено аналіз конструкції, принципу роботи та технологічних особливостей парових котлів насиченого типу. Детально охарактеризовано ключові параметри, що впливають на ефективність виробництва пари: тиск, температура насиченої пари, рівень води, якість живильної води, розрідження в топці, витрати палива та повітря. Показано, що стабільність цих показників є критично важливою для технологічних процесів харчової промисловості, де пара використовується як теплоносіє у широкому спектрі операцій. Проведений аналіз існуючих підходів дав змогу визначити основні напрями оптимізації системи керування.

У другому розділі розроблено та обґрунтовано математичну модель об'єкта керування, яка містить взаємопов'язані контури регулювання основних параметрів котла. Проведено структурний аналіз об'єкта, визначено динамічні характеристики процесу та сформовано моделі окремих підсистем. В результаті отримано цілісне уявлення про взаємозв'язки між параметрами, що дозволило синтезувати алгоритми автоматичного регулювання, адекватні реальним умовам роботи парового котла. Запропоновані методи регулювання забезпечують стабільність процесу в умовах змінних теплових та технологічних навантажень.

У третьому розділі виконано програмно-технічну реалізацію системи, що включає розробку структури автоматизації, алгоритмів керування, сигналізації та захисту. Сформовано комплекс управління, який охоплює ключові контури:

підтримання тиску і температури насиченої пари, регулювання розрідження у топці, керування подачею палива та повітря, автоматичну продувку та підживлення котла водою. Реалізовано логічну взаємодію між підсистемами та забезпечено можливість роботи в автоматичному режимі з мінімальним втручанням оператора. Використання сучасних ПЛК, датчиків і модулів збору даних дозволило сформувати надійну та адаптивну систему, придатну для інтеграції у SCADA.

Загалом розроблена автоматизована система керування забезпечує:

- підвищення енергоефективності та зниження витрат палива;
- стабілізацію параметрів насиченої пари в широкому діапазоні навантажень;
- підвищення безпеки за рахунок ефективних засобів сигналізації та технологічного захисту;
- зменшення впливу людського фактору;
- покращення загальної надійності та ресурсу котельного обладнання;
- відповідність сучасним вимогам харчового виробництва.

Отримані результати мають практичну значущість та можуть бути впроваджені на реальному промисловому об'єкті. Запропонований підхід до автоматизації парового котла може бути адаптований і для інших типів котельних установок, що робить роботу актуальною та перспективною для подальших досліджень і практичних застосувань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко В. С., Котляр А. С. Парові котли: конструкція, робота, обслуговування. Київ: Техніка, 2016. 412 с.
2. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А. Котельні установки та парогенератори. Київ: АСТЕ, 2017. 368 с.
3. Зорін Ю. Б. Теплоенергетичні установки та обладнання. Харків: НТУ «ХП», 2018. 520 с.
4. Мірошніченко В. І. Теплотехніка та теплові установки. Київ: НТУУ «КП», 2015. 456 с.
5. Поплавський В. Д., Карасьов О. Ю. Теплотехнічні процеси та установки. Одеса: ОНАХТ, 2019. 384 с.
6. Клименко В. В. Автоматизація теплотехнічних процесів. Київ: Кондор, 2020. 310 с.
7. Жук Г. В. Сучасні системи автоматизації котельних установок. Львів: Растр-7, 2018. 268 с.
8. ДСТУ 2326-93. Котли парові. Терміни та визначення. Київ, 1994. 32 с.
9. ДБН В.2.5-77:2014. Котельні установки. Київ, 2014. 68 с.
10. Бойченко С. В. Теплові електростанції та обладнання котельних установок. Київ : Ліра-К, 2016. 540 с.
11. Горюшин В. М. Теплообмінні апарати і теплотехнічні системи. Харків : ХНЕУ, 2017. 292 с.
12. Сінчук В. Г., Дьяконов В. В. Промислові системи автоматичного керування. Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. 340 с.
13. Котельні установки та мереж. / За ред. О. П. Марченка. Київ : Аграрна освіта, 2019. 305 с.
14. Соколов Є. Я. Основи теплотехніки. Київ : Вища школа, 2015. 400 с.

15. Роговий А. С. Контроль і автоматизація енергетичних об'єктів. Харків : ХНЕУ, 2021. 370 с.
16. Коцин В. М. Теплотехнічні вимірювання та прилади. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2018. 214 с.
17. Литвиненко Л. М. Процеси та апарати харчових виробництв. Київ : Кондор, 2020. 456 с.
18. Семенов В. Г. Автоматизація об'єктів теплотехніки. Дніпро : УДХТУ, 2018. 288 с.
19. Клименко Н. І., Тарасюк А. В. Системи контролю та керування теплотехнічних процесів. Харків : ХНАМГ, 2016. 220 с.
20. ДСТУ ISO 16528-1:2015. Котли та посудини, що працюють під тиском. Загальні вимоги, 2015. 40 с.
21. Горбань В. В. Теплотехнічна автоматика. Ч. 1. Київ : НАУ, 2019. 280 с.
22. Горбань В. В. Теплотехнічна автоматика. Ч. 2. Київ : НАУ, 2020. 252 с.
23. Ковальчук М. І. Експлуатація котельних агрегатів. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2017. 335 с.
24. Бондаренко В. О. Діагностика та контроль котельних установок. Дніпро : Пороги, 2016. 260 с.
25. Савчук С. В. Теплові процеси в харчовій промисловості. Одеса : ОНАХТ, 2021. 390 с.
26. Грицай О. В. Енергетичні системи підприємств. Київ : КНЕУ, 2015. 240 с.
27. Тіщенко А. А. Проектування систем автоматизації. Харків : ХНУРЕ, 2020. 318 с.
28. Дьяконов О. В. Системи керування технологічними процесам. Полтава : ПНТУ, 2019. 280 с.
29. Курсов О. Г. Механізми теплопередачі в промислових установках. Луцьк : Вежа-Друк, 2017. 198 с.

30. Мельник І. І. Основи енергоменеджменту. Тернопіль: ТНТУ, 2021. 256 с.
31. Сторожук В. М. Теплові мережі та котельні установки. Вінниця: ВНТУ, 2018. 284 с.
32. Мазур В. М., Костюк І. В. Паливні системи та котельні агрегати промислових підприємств. Київ: Кондор-Видавництво, 2019. 312 с.
33. Шевченко С. Г. Технічна експлуатація енергетичного обладнання. Харків: НТУ "ХПІ", 2020. 350 с.
34. Снопок Р. М. Автоматизація енерготехнологічних процесів. Черкаси: ЧДТУ, 2017. 228 с.
35. Власенко П. І. Основи теплотехнічних розрахунків. Запоріжжя: ЗДІА, 2016. 240 с.
36. Маринич І. А., Тронь В. В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50с.
37. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).
38. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
39. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)
40. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).